



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industriel et Environnement

Thème

Etude d'impact du changement climatique sur la céréaliculture (blé dur)

Présenté et soutenu publiquement par :

Rebouh Aimen Abdderahmene et Chenen Younes

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Établissement | Qualité |
|----------------------|----------------------|---------------------|
| Talbi Zahera | IMSI | Encadreur |
| Kerroum Mohammed | IHFR | Co-Encadreur |
| Hebbar Chafika | IMSI | Président |
| Nadji Mohammed Amine | IMSI | Examinateur |

Année Universitaire 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de reconnaissance et d'amour à :

Ma chère maman, pour son amour, ses sacrifices, son soutien et pour tous.

• Mon cher père pour ses encouragements, son soutien moral et matériel.

• A Mes encadrants : madame Talbi Zahera et Kerroum Mohammed.

Un spécial dédicace à :

• Ma collègue, mon ami, mon binôme : Younes.

• A toutes les meilleures personnes qui m'aiment et qui m'aident dans ma vie.

À toute personne de près ou de loin qui m'a souhaité que la réussite et une carrière professionnelle au futur.

REBOUH AIMEN

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma mère et mon père.

A la famille CHENEN.

Et à tous ceux que j'ai rencontrés.

CHENEN Younes

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah tout-puissant de nous avoir guidés dans ce travail et de nous avoir accordé l'aide et la force nécessaire pour le mener à bien ce mémoire de fin d'étude.

Nous tenons à remercier sincèrement notre directeur de mémoire, les professeurs Mme. Talbi Zahera et M. Kerroum Mohammed, pour leur guidance précieuse tout au long de ce projet. Leurs conseils éclairés, leurs disponibilités et leur expertise ont grandement contribué à la qualité et à la rigueur de ce travail.

Nous aimerions également exprimer notre reconnaissance envers le reste de l'équipe enseignante du département Hygiène et Sécurité Industriel.

Nous remercions chers membres du jury d'avoir accepté d'être notre jury.

Merci.

Résumé

Les scénarios du changement climatique à l'échelle globale annoncent une diminution des pluies annuelles et une augmentation de la demande en eau. Dans de telles conditions, quels seront les impacts potentiels de ces changements sur la culture du blé dur, et notamment dans la région de Sidi Bel Abbes ? Région connue pour son climat semi-aride. Pour cela, nous avons utilisé les sorties d'un modèle de simulation de développement des cultures SARRA-H qui est conçu comme un outil de simulation opérationnel en conditions agricoles. Dans le but de quantifier l'importance de l'irrigation complémentaire comme facteur d'amélioration du rendement de blé dur. Nous remarquons d'après notre étude que le manque de pluies durant certains mois influe énormément sur le rendement global et qu'il suffit de combler ce manque pour sauver la saison agricole.

Deux régimes d'eau, pluviale et irrigué en relation avec les précipitations et les stades de la culture ont été appliqués sur les cinq variétés : Bousselam, Chen's, Ouedzenati, Vitron, Waha, les résultats de la simulation de l'impact de projection de changements climatique par le modèle SARRA-H à l'horizon de (2024 -2040) estime un effet positif sur le rendement de blé dur. Cette estimation pourrait atteindre une augmentation de rendement pour la variété Waha dans la wilaya de Sidi Bel Abbes.

Mot clés : changement climatique, pluies, SARRA-H, irrigation, simulation, variétés, rendement, blé dur, agricole.

ملخص

تتنبأ سيناريوهات تغير المناخ على النطاق العالمي بانخفاض معدل هطول الأمطار السنوي وزيادة الطلب على المياه. في ظل هذه الظروف، ما هي الآثار المحتملة لهذه التغييرات على زراعة القمح الصلب، وخاصة في منطقة سيدي بلعباس؟ منطقة معروفة بمناخها شبه الجاف. لهذا الغرض، استخدمنا نموذج محاكاة تنمية المحاصيل SARRA-H والذي تم تصميمه كأداة محاكاة تشغيلية في الظروف الزراعية من أجل تحديد أهمية الري التكميلي كعامل لتحسين محصول القمح الصلب. ونلاحظ من دراستنا أن قلة الأمطار تؤثر خلال أشهر معينة بشكل كبير على المحصول الكلي وأنه يكفي لسد هذه الفجوة لإنقاذ الموسم الزراعي. تم تطبيق نظامين مائيين بعلي ومروي على الأصناف الخمسة Bousselam، Chen's، Ouedzenati، Vitron، Waha، نسبة لهطول الأمطار ومراحل الزراعة.

نتائج محاكاة تأثير إسقاط تغير المناخ بواسطة نموذج SARRA-H لأفق (2024 - 2040) تقدر تأثير إيجابي على محصول القمح القاسي حيث بلغ هذا التقدير زيادة للمردود في صنف Waha بولاية سيدي بلعباس.

الكلمات المفتاحية: تغير المناخ، القمح الصلب، أصناف، الأمطار، محاكاة، الري التكميلي، محصول، الزراعة.

Abstract

Climate change scenarios on a global scale predict a decrease in annual precipitation and an increase in water demand. Under these conditions, what are the possible effects of these changes on the cultivation of durum wheat, especially in the Sidi Bel Abbes region? An area known for its semi-arid climate. For this purpose, we used the SARRA-H crop development simulation model, which was designed as an operational simulation tool in agricultural conditions in order to determine the importance of supplemental irrigation as a factor to

improve the yield of durum wheat agricultural season. Two rained and irrigated water systems were applied to the five varieties: Bousselam, Chen's, Ouedzenati, Vitron, and Waha, in proportion to rainfall and cultivation stages.

The results of the simulation of the impact of climate change projection using the SARRA-H horizon model (2024-2040) estimate a positive impact on the durum wheat crop. This estimate can reach an average increase in the Waha variety in the Wilaya of Sidi Bel Abbas.

Key words: Climate change, scenarios, precipitation, SARRA-H, simulation, cultivation, supplemental irrigation, estimate, varieties.

| | |
|--|----|
| Figure 1. Changement de la température à la surface du globe (1850-2020)..... | 7 |
| Figure 2. Le bilan énergétique de la Terre compare les flux d'énergie entrants et sortants qui sont déterminants pour le système climatique. | 8 |
| Figure 3. Les températures moyennes annuelles mondiales pour les années 1880-2022. | 9 |
| Figure 4. Moyenne de la température en Algérie (1991-2022). | 10 |
| Figure 6. Stades de développement du blé. | 18 |
| Figure 7. Les dates de semis de blé..... | 23 |
| Figure 8. Carte de localisation de la région des hautes plaines de Sidi-Bel-Abbès..... | 31 |
| Figure 9. Localisation géographique, étage bioclimatique de la région d'étude..... | 32 |
| Figure 10. Irrigations créées en 2001..... | 40 |
| Figure 11. Irrigation créées en 2002..... | 40 |
| Figure 12. Irrigations créées en 2003..... | 41 |
| Figure 13. Irrigations créées en 2004..... | 41 |
| Figure 14. Irrigations créées en 2005..... | 42 |
| Figure 15. Irrigations créées en 2006..... | 42 |
| Figure 16. Irrigations créées en 2007..... | 43 |
| Figure 17. Irrigations créées en 2008..... | 43 |
| Figure 18. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2001-2003..... | 45 |
| Figure 19. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2004-2006..... | 46 |
| Figure 20. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2007-2008..... | 46 |
| Figure 21. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2001-2003..... | 47 |
| Figure 22. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2004-2006..... | 47 |
| Figure 23. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2007-2008..... | 48 |
| Figure 24. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2001-2003..... | 49 |
| Figure 25. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2004-2006..... | 49 |
| Figure 26. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2007-2008..... | 50 |
| Figure 27. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2001-2003..... | 51 |
| Figure 28. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2004-2006..... | 51 |
| Figure 29. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2007-2008..... | 52 |
| Figure 30. Simulation Waha sans et avec irrigation 2001-2003..... | 53 |
| Figure 31. Simulation Waha sans et avec irrigation 2004-2006..... | 53 |
| Figure 32. Simulation Waha sans et avec irrigation 2007-2008..... | 54 |
| Figure 33. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2024..... | 55 |
| Figure 34. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2025-2027..... | 56 |
| Figure 35. Simulation Boussalem avec et sans irrigation 2028-2030..... | 56 |
| Figure 36. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2031-2033..... | 56 |
| Figure 37. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2034-2036..... | 57 |
| Figure 38. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2037-2039..... | 58 |
| Figure 39. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2040..... | 58 |
| Figure 40. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2024..... | 60 |
| Figure 41. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2025-2027..... | 60 |
| Figure 42. Simulation Chen's avec et sans irrigation 2028-2030..... | 61 |
| Figure 43. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2031-2033..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Figure 44. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2034-2036..... | 62 |
| Figure 45. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2037-2039..... | 63 |
| Figure 46. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2040..... | 63 |
| Figure 47. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2024. | 65 |
| Figure 48. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2025-2027. | 65 |
| Figure 49. Simulation Ouedzenati avec et sans irrigation 2028-2030. | 66 |
| Figure 50. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2031-2033. | 67 |
| Figure 51. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2034-2036. | 67 |
| Figure 52. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2037-2039. | 68 |
| Figure 53. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2040. | 69 |
| Figure 54. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2024. | 70 |
| Figure 55. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2025-2027..... | 70 |
| Figure 56. Simulation Vitron avec et sans irrigation 2028-2030..... | 71 |
| Figure 57. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2031-2033..... | 72 |
| Figure 58. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2034-2036..... | 72 |
| Figure 59. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2037-2039..... | 73 |
| Figure 60. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2040..... | 73 |
| Figure 61. Simulation Waha sans et avec irrigation 2024..... | 75 |
| Figure 62. Simulation Waha sans et avec irrigation 2025-2027..... | 75 |
| Figure 63. Simulation Waha avec et sans irrigation 2028-2030..... | 76 |
| Figure 64. Simulation Waha sans et avec irrigation 2031-2033..... | 77 |
| Figure 65. Simulation Waha sans et avec irrigation 2034-2036..... | 77 |
| Figure 66. Simulation Waha sans et avec irrigation 2037-2039..... | 78 |
| Figure 67. Simulation Waha sans et avec irrigation 2040..... | 78 |

| *Liste des Tableaux*

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Les grands pays producteurs du blé dans la période 2010-2020. | 14 |
| Tableau 2. Rendement (en hg/ha) des céréales en Algérie entre les années 2010 et 2020.. | 15 |
| Tableau 3. Caractéristiques de quelques variétés du blé dur en Algérie. | 21 |
| Tableau 4. Besoin en eau (mm) du blé. | 25 |
| Tableau 5. Les moyennes de cinq variété (2001-2008) | 81 |
| Tableau 6. Les moyennes de cinq variétés (2022-2040). | 83 |

| *Liste des Abréviations*

| Acronyme | Signification |
|----------------|---|
| BOUS_X_AVEC | Simulation Boussalem avec irrigation |
| BOUS_X_SANS | Simulation Boussalem sans irrigation |
| CC | Changement Climatique |
| CH4 | Méthane Gaz |
| CHENS_X_AVEC | Simulation Chen's avec irrigation |
| CHENS_X_SANS | Simulation Chen's sans irrigation |
| CO2 | Dioxyde de Carbone |
| DPAT | Direction de la Planification et de l'Aménagement du territoire |
| D.S.A | Direction des Services Agricoles |
| GES | Gaz à Effet de Serre |
| GIEC | Group International d'Experts en Climat |
| HI | Indice de Récolte |
| IHFR | Institut Hydrométéorologique de Formation et de Recherches |
| ITGC | Institut Technique des Grandes Cultures |
| LAI | Leaf Area Index |
| MADR | Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural |
| N2O | Protoxyde d'azote |
| ONM | Office National de Météorologie |
| OZENATI_X_AVEC | Simulation Ouedzenati avec irrigation |
| OZENATI_X_SANS | Simulation Ouedzenati sans irrigation |
| PMG | Poids de Mille Grains |
| PNC | Plan National de Climat |
| ppm | Partie Par Million |
| RMSG | Rendement en Matière Sèche Grains |
| ROSELT | Réseau d'Observations et de Suivi Ecologique à Long Terme |
| SARRA-H | Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques |
| SAU | Superficie Agricole Utile |
| Tmax | Température Maximale |
| Tmin | Température minimale |
| VITRON_X_AVEC | Simulation Vitron avec irrigation |
| VITRON_X_SANS | Simulation Vitron sans irrigation |
| WAHA_X_AVEC | Simulation Waha avec irrigation |
| WAHA_X_SANS | Simulation Waha sans irrigation |

| | |
|--|-------------|
| <i>Dédicace</i> | <i>I</i> |
| <i>Remerciement</i> | <i>III</i> |
| <i>Résumé</i> | <i>IV</i> |
| <i>Liste des Figures</i> | <i>IVI</i> |
| <i>Liste des Tableaux</i> | <i>IVII</i> |
| <i>Liste des Abréviations</i> | <i>IVIX</i> |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| Chapitre I : Le Changement Climatique | |
| <i>I.1. Introduction</i> | <i>4</i> |
| <i>I.2. Définition du changement climatique</i> | <i>4</i> |
| <i>I.3. Les causes du changement climatique</i> | <i>4</i> |
| I.3.1. Les causes d'origine naturelle | <i>4</i> |
| I.3.2. Les causes d'origine anthropique | <i>5</i> |
| I.3.2.1. Production d'énergie..... | <i>5</i> |
| I.3.2.2. Fabrication de produits | <i>5</i> |
| I.3.2.3. Abattage de forêts | <i>6</i> |
| I.3.2.4. Utilisation de moyens de transport | <i>6</i> |
| I.3.2.5. Production de denrées alimentaires | <i>6</i> |
| I.3.2.6. Alimentation des bâtiments en énergie | <i>6</i> |
| I.3.2.7. Surconsommation | <i>6</i> |
| <i>I.4. Le réchauffement climatique</i> | <i>7</i> |
| I.4.1. Gaz à effet de serre | <i>7</i> |
| <i>I.5. Evolution du climat</i> | <i>8</i> |
| I.5.1. Dans le monde..... | <i>8</i> |
| I.5.2. Dans l'Algérie | <i>9</i> |
| <i>I.6. Impacts des changements climatiques sur l'agriculture</i> | <i>10</i> |
| I.6.1. En monde | <i>10</i> |
| I.6.2. En Algérie | <i>11</i> |
| <i>I.7. Impacts du changement climatique sur la céréaliculture</i> : | <i>12</i> |
| I.7.1. Impact du réchauffement futur | <i>12</i> |
| I.7.2. Effets d'une atmosphère riche en CO ₂ | <i>12</i> |
| <i>Conclusion</i> | <i>13</i> |
| Chapitre II : La céréaliculture (Blé Dur) | |
| <i>II.1. Importance des céréales</i> | <i>14</i> |
| II.1.1 Importance de la céréaliculture dans le monde..... | <i>14</i> |
| II.1.2. Importance de la céréaliculture en Algérie | <i>15</i> |
| <i>II.2.1. La production des céréales en Algérie</i> | <i>15</i> |
| II.2.2. Consommation du blé en Algérie..... | <i>15</i> |
| II.2.3. Les importations du blé en Algérie | <i>16</i> |
| <i>II.3. La culture de blé dur</i> | <i>16</i> |
| II.3.1 Stades de développement du blé dur | <i>16</i> |
| II.3.1.1. La période végétative | <i>16</i> |

| | |
|---|-----------|
| II.3.1.1.1. La phase germination – levée | 16 |
| II.3.1.1.2. Phase levée-tallage | 16 |
| a) Stade de formation du plateau de tallage | 16 |
| b) Stade d'émission des talles..... | 17 |
| II.3.1.2. La période reproductrice..... | 17 |
| II.3.1.2.1. La phase montaison et le gonflement | 17 |
| II.3.1.2.2. La phase épiaison – floraison..... | 17 |
| II.3.1.3. La période de formation et maturation des grains..... | 17 |
| II.3.1.3.1. La phase de grossissement du grain | 18 |
| Phase de la maturité laiteuse | 18 |
| II.3.1.3.2. La phase de maturation..... | 18 |
| II.3.1.3.2.1. Phase maturité pâteuse..... | 18 |
| II.3.1.3.2.2. Phase maturité complète | 18 |
| <i>II.4. Exigences de blé dur</i> | <i>19</i> |
| II.4.1. Exigences climatiques | 19 |
| II.4.1.1. Température | 19 |
| II.4.1.2. Lumière..... | 19 |
| II.4.1.3. Eau..... | 19 |
| II.4.2. Exigences édaphiques | 19 |
| <i>II.5. Techniques culturales</i> | <i>20</i> |
| II.5.1. Préparation de lit de semence | 20 |
| II.5.1.1. Labour profond | 20 |
| II.5.1.1.1. Labour..... | 20 |
| II.5.1.1.2. Orientation du labour..... | 20 |
| II.5.1.1.3. Reprise du labour | 20 |
| II.5.1.2. Rôle de travail du sol..... | 20 |
| II.5.2. Semis | 20 |
| II.5.2.1. Les éléments à contrôler sont..... | 20 |
| II.5.2.2. Choix de la variété - Les variétés du blé dur | 21 |
| II.5.2.3. Profondeur de semis | 22 |
| II.5.2.4. Date de semis | 23 |
| II.5.2.5. Densité de semis..... | 24 |
| <i>II.5. Besoins en eau</i> | <i>24</i> |
| II.5.1. Importance et rôle de l'eau dans le végétal | 24 |
| II.5.2. Les besoins en eau du blé | 24 |
| <i>II.6. La sécheresse en agriculture</i> | <i>26</i> |
| II.6.1. Notion de stress..... | 26 |
| II.6.1.1. Le stress hydrique | 26 |
| II.6.1.1.1. Effet du stress hydrique sur le développement des plantes | 26 |
| II.6.1.1.2. Influence du stress hydrique sur le rendement du blé | 27 |
| <i>II.7. Le rendement et ses composants</i> | <i>27</i> |
| 4. grandes composantes du rendement | 27 |
| 1. Impact de la densité d'épis sur le rendement du blé..... | 27 |
| 2. Impact de la fertilité-épi sur le rendement du blé | 28 |
| 3. Impact du poids des mille grains (PMG) sur le rendement du blé | 28 |
| 4. Indice de récolte (HI)..... | 28 |
| <i>II.8. Le LAI ou Indice foliaire</i> | <i>28</i> |

| | |
|--|-------------|
| II.8.1. Rôle fonctionnel du LAI..... | 28 |
| CHAPITRE III : MATÉRIELLES ET MÉTHODES..... | 30 |
| <i>Introduction.....</i> | <i>3030</i> |
| <i>PARTIE 1 : MATÉRIELLES.....</i> | <i>30</i> |
| <i>III.I. Présentation générale de la zone d'étude.....</i> | <i>30</i> |
| III.I.1. Situation géographique | 30 |
| III.I.1.2. Le relief..... | 31 |
| a) Les zones de montagnes | 31 |
| b) Les zones de plaine | 31 |
| c) Les zones de steppe | 32 |
| III.I.1.3. Végétation | 32 |
| III.I.1.4. Climat de la zone | 33 |
| III.I.1.4.1. La pluviométrie | 33 |
| III.I.1.4.2. La température..... | 33 |
| 2.1. Activités agricoles..... | 33 |
| 2.2. Séries de données appliquées dans cette étude :..... | 34 |
| <i>PARTIE 2 : MÉTHODES ET DISCUSSION</i> | <i>35</i> |
| <i>III.II. Présentation du modèle 'SARRA-H'</i> | <i>35</i> |
| III.II.1. Généralité sur SARRA-H | 35 |
| III.II.1.1. Description du modèle..... | 35 |
| III.II.1.2. Le domaine d'application | 35 |
| III.II.1.3. Les variables d'entrée du modèle SARRA-H..... | 35 |
| III.II.1.4. Principes de fonctionnement..... | 36 |
| III.II.1.4.1. Création d'un pays et d'une station météorologique ou pluviométrique | 37 |
| III.II.1.4.2. Importation des données automatique | 37 |
| III.II.1.4.3. Le site | 37 |
| III.II.1.4.4. Les Données météorologiques et pluviométriques..... | 37 |
| III.II.1.4.5. Les Paramètres de la culture | 38 |
| III.II.1.4.6. Irrigation | 38 |
| III.II.1.4.7. Importation des données | 38 |
| III.II.1.4.8. La simulation..... | 38 |
| III.II.1.5. L'irrigation complémentaire | 39 |
| III.II.1.5.1. Complémentaire par rapport à quoi ? | 39 |
| III.II.1.5.2. Intérêt de l'irrigation de complément | 39 |
| III.II.1.5.3. Dose et date d'irrigation | 39 |
| III.II.2.2. Résultats des simulations des rendements (2001-2008)..... | 45 |
| III.II.2.3. Résultats de simulations des rendements pour l'horizon 2024-2040..... | 55 |
| <i>Discussion.....</i> | <i>80</i> |
| III.II.2.4. Partie calibration | 80 |
| III.II.2.5. Partie future..... | 82 |
| Conclusion | 83 |
| <i>Conclusion générale</i> | <i>84</i> |
| <i>Bibliographie</i> | |
| <i>Annexe</i> | |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le changement climatique est l'une des plus grandes menaces pour l'agriculture au cours des années à venir [1]. Il fait référence à une période pendant laquelle un pays ou une région subit des changements des conditions météorologiques par rapport à ce qui est habituel. Non seulement cela, mais cela fait également référence aux changements des saisons sur des longues périodes de temps. Ces changements sont notamment devenus plus drastiques ces dernières années, principalement en raison du réchauffement climatique.

Le changement climatique devrait augmenter les températures futures, entraînant potentiellement une réduction de la production agricole dans de nombreuses régions de production clés [2], ce dernier représente une menace sérieuse pour la productivité des cultures dans les régions déjà en situation d'insécurité alimentaire [3] et représente aussi un défi important pour la fourniture des céréales de qualité constante à l'avenir en raison des interactions complexes du CO₂ atmosphérique, de l'évolution des températures et des précipitations sur le rendement et la qualité [4]. Le changement climatique est une menace environnementale mondiale pour tous les secteurs économiques, en particulier le secteur agricole [5] qui est extrêmement sensible aux variations climatiques.

La modification des régimes de précipitations augmente la probabilité des mauvaises récoltes à court terme et d'une baisse de la production à long terme. Bien que certaines régions du monde puissent enregistrer une amélioration de quelques-unes de leurs cultures.

En Algérie, l'agriculture est en continuelle extension et intensification de nouvelles zones sont exploitées dans le cadre de la mise en valeur des terres agricoles, entre autres au niveau des hautes plaines et du grand sud, par la création de nouveaux pôles de production soutenues par le programme du renouveau agricole et rural. Les cultures stratégiques comme les céréales, la pomme de terre et l'oléiculture occupent de plus en plus de superficies.

Cependant toutes ces cultures sont sujettes à des attaques de parasites. De même, les aléas climatiques notamment l'irrégularité de la pluviométrie et les fluctuations des températures font subir aux cultures d'importants dommages dans leur développement et leurs productions.

Depuis quelques années, les agriculteurs se sont habitués graduellement à des pluies printanières jugées auparavant tardives. Cependant les experts de la météorologie les trouvent de plus en plus naturelles à la faveur du changement climatique que connaît la planète. Pour les instances chargées du secteur agricole et du développement rural, le changement climatique n'a pas encore été pris en compte dans notre pays. Nos agriculteurs subissent des pertes à cause de pluies torrentielles et des houleuses intempéries survenues en certaines périodes.

Celles-ci avaient été dévastatrices et ont eu de lourdes répercussions sur les surfaces cultivées et le matériel agricole dans plusieurs régions. A cet effet, la prévention des effets

des variations climatiques est devenue un thème essentiel sur lequel des experts étrangers s'attellent afin d'élucider d'avantage les diverses circonstances relatives aux vents violents, aux pluies torrentielles et à la grêle qui ne cessent de porter d'énormes préjudices aussi bien à l'être humain qu'à son environnement dans toutes ses facettes. L'Algérie a connu au cours des 25 dernières années, une sécheresse intense et persistante caractérisée par un déficit pluviométrique important. Cette sécheresse a touché l'ensemble du territoire et à sévit particulièrement dans les régions nord-ouest du pays.

Devant la gravité de cette situation qui intervient à une période où les besoins en eau se sont considérablement accrus, les planificateurs et les gestionnaires des ressources en eau sont interpellés et s'interrogent sur l'ampleur et l'extension du phénomène, ses causes et ses conséquences et les stratégies à mettre en œuvre pour atténuer ses effets.

En Algérie, la pratique de la culture pluviale quoi qu'elle corresponde à une pluviométrie supérieure à 450 mm/an ne représentent que 4.8 millions d'ha, dont presque la moitié, soit 2 millions d'ha sont annuellement non travaillés, en raison du manque de pluie et surtout de sa mauvaise répartition dans l'espace et dans le temps.

Le blé est traditionnellement cultivé en sec. Cependant la production est instable et insuffisante notamment dans les conditions pédoclimatiques de l'Algérie. Ainsi, malgré l'importance du blé dans le régime alimentaire, et bien que la production céréalière (toutes espèces confondues) ne couvre que 30% en moyenne des besoins du pays selon [6], durant la période de 1980-96 la céréaliculture n'a connu qu'une très faible amélioration de 6.21%.

Mis à part la zone de l'extrême Nord-ouest de l'Algérie, durant leur cycle végétatif, toutes les cultures pluviales sont soumises à des déficits de consommation en eau, parfois très importants, provoquant ainsi des stress d'intensité, de durée et/ou de fréquence variable ne permettant pas l'obtention de rendements compétitifs. En année sèche, des surfaces considérables sont déclarées non productives, à cause du stress hydrique terminal qui représente le principal facteur de limitation des niveaux du rendement des cultures céréalières non irriguées [7].

Deux contraintes semblent être à l'origine de cet état, les variations interannuelles des pluies et leurs répartitions dans le temps. Ainsi la culture de blé reste toujours menacée par l'irrégularité des pluies car elle ne dépend pas seulement de leur quantité mais surtout des épisodes de déficit hydrique très souvent critique durant le cycle végétatif. Pour pallier ce phénomène, l'irrigation d'appoint du blé s'impose à notre pays.

L'introduction de l'irrigation complémentaire du blé dans le développement agricole de l'Algérie est d'un grand intérêt. Bien que toutes les expérimentations à travers le monde et en Algérie confirment l'intérêt des irrigations complémentaires pour l'amélioration et la stabilisation des rendements des céréales d'où l'autosuffisance et une réduction de la

dépendance économique, ainsi que pour la valorisation de l'eau d'irrigation en condition de déficit pluviométrique.

Il est nécessaire de lancer les recherches et les expérimentations dans ce domaine qui représente une vraie nouveauté dans le déroulement de l'itinéraire technique des céréales afin d'aboutir à des nouvelles techniques et les transmettre aux agriculteurs pour qu'ils les adoptent.

C'est dans le cadre de notre travail que s'inscrivent nos essais sur deux exploitations agricoles dans la région de Sidi Bel Abbes qui ont pour but de :

- Quantifier les potentialités de production du blé dur conduit sous l'irrigation d'appoint pour le premier essai (exploitation concerné) et sans irrigation pour le deuxième essai (témoin).

- Quantifier les effets bénéfiques d'un appoint d'eau apporté à différentes phases phénologiques de la période de reproduction du blé dur pour le premier essai. Comparer la production relative à l'irrigation du premier essai par rapport au témoin (sans irrigation).

Les résultats des essais contribueront à confirmer et à sensibiliser les agriculteurs et les décideurs à tous les niveaux de l'intérêt des irrigations apportées à des phases phénologiques bien ciblées sur les principales composantes du rendement d'une culture de blé dur, ainsi qu'à l'amélioration de la productivité de l'eau d'appoint.

Ce mémoire s'articulera autour de deux parties. Dans la première partie, on dressera une synthèse bibliographique dans laquelle on s'intéresse successivement au changement climatique et l'agriculture, aux impacts du changement climatique sur la physiologie de la plante et les impacts attendus sur la production végétale agricole en Algérie.

Dans la deuxième partie, on présente les modèles utilisés, les données et les variables utilisées et la méthodologie avec laquelle ont été traitées les données dont on dispose, puis on s'intéressera à l'interprétation des résultats et discussions

1.1. Introduction

Les changements climatiques sont la question déterminante de notre époque et nous sommes à un moment décisif. De l'évolution des conditions météorologiques, qui ont des effets sur la production agricole et alimentaire, à l'élévation du niveau des mers, qui augmente les risques d'inondations, les conséquences des changements climatiques sont mondiales en termes d'effets et d'échelle. Sans action immédiate, il sera beaucoup plus difficile et coûteux de s'adapter aux conséquences futures de ces changements.

1.2. Définition du changement climatique

Les changements climatiques sont une modification à long terme des conditions météorologiques. Divers indicateurs en témoignent, notamment sous la forme de modification de la température, des précipitations et des vents. Les changements climatiques peuvent comprendre à la fois une modification des conditions météorologiques moyennes et une modification de la variabilité, par exemple des phénomènes extrêmes.

Le changement climatique peut être un processus naturel au cours duquel la température, les précipitations, le vent et d'autres éléments varient sur des dizaines d'années ou plus. Sur des millions d'années, notre planète a connu des périodes plus chaudes ou plus froides qu'aujourd'hui. Toutefois, à l'heure actuelle, nous sommes confrontés à un réchauffement rapide sans précédent, imputable aux activités humaines et principalement à la combustion de combustibles fossiles qui génèrent des émissions de gaz à effet de serre.

1.3. Les causes du changement climatique

La combustion de combustibles fossiles génère des émissions de gaz à effet de serre qui agissent comme une couverture autour de la terre, emprisonnant la chaleur du soleil et entraînant une hausse des températures. Les émissions de dioxyde de carbone et de méthane, notamment, sont à l'origine des changements climatiques. Elles résultent par exemple de l'utilisation de carburants pour alimenter les véhicules ou du charbon pour chauffer un bâtiment. Le défrichage des terres et des forêts peut également entraîner la libération de dioxyde de carbone. L'agriculture et les moteurs à combustion constituent une source importante d'émissions de méthane. Les secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports et de la construction ainsi que de l'agriculture et d'autres utilisations des terres figurent parmi les principaux émetteurs

1.3.1. Les causes d'origine naturelle

Des facteurs naturels externes au système climatique, comme des changements de l'activité volcanique, de l'émission d'énergie solaire et de l'orbite de la Terre autour du Soleil, peuvent altérer le climat de la planète. Parmi ceux-ci, les deux facteurs qui sont déterminants à des échelles temporelles pour les changements climatiques contemporains sont les changements à l'activité volcanique et les changements au rayonnement solaire. En ce qui a trait à l'équilibre énergétique de la Terre, ces facteurs agissent principalement sur la quantité d'énergie reçue. Les éruptions volcaniques sont épisodiques et exercent des effets sur le climat pendant une durée relativement courte. Les changements de l'irradiation solaire ont contribué aux tendances climatiques au cours du dernier siècle, mais, depuis la révolution

industrielle, l'effet des apports de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a été environ 50 fois plus marqué que celui des changements de l'émission d'énergie solaire.

1.3.2. Les causes d'origine anthropique

Depuis le début de la révolution industrielle, l'influence anthropique sur le système climatique a augmenté considérablement. En plus d'autres incidences environnementales, ces activités modifient la surface terrestre et émettent diverses substances dans l'atmosphère. Ces substances peuvent, quant à elles, exercer un effet sur la quantité d'énergie reçue et la quantité d'énergie sortante, ce qui peut avoir à la fois un effet de réchauffement et de refroidissement du climat. Le dioxyde de carbone, un gaz à effet de serre, est le principal produit de la combustion de combustibles fossiles. L'effet global des activités humaines depuis le début de la révolution industrielle a été un effet de réchauffement, alimenté principalement par les émissions de dioxyde de carbone et intensifié par les émissions d'autres gaz à effet de serre.

L'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère a mené à un accroissement de l'effet de serre naturel. C'est cet accroissement de l'effet de serre par l'activité anthropique qui est préoccupant, car les émissions continues de gaz à effet de serre ont le potentiel de réchauffer la planète à des niveaux sans précédent dans l'histoire de l'humanité. De tels changements climatiques pourraient avoir de lourdes conséquences environnementales, sociales et économiques imprévisibles.

Les changements climatiques peuvent également être causés par les activités humaines, comme :

1.3.2.1. Production d'énergie

La production d'électricité et de chaleur par la combustion de combustibles fossiles est à l'origine d'une grande partie des émissions mondiales. La majeure partie de l'électricité est encore produite par la combustion de charbon, de pétrole ou de gaz, ce qui génère du dioxyde de carbone et de l'oxyde nitreux, puissants gaz à effet de serre qui enveloppent la Terre et retiennent la chaleur du soleil. À l'échelle mondiale, un peu plus d'un quart de l'électricité provient de sources renouvelables (énergie éolienne, énergie solaire et autres) qui, contrairement aux combustibles fossiles, ne rejettent que peu ou pas de gaz à effet de serre ou de polluants dans l'air.

1.3.2.2. Fabrication de produits

Le secteur manufacturier et l'industrie génèrent des émissions, principalement dues à la combustion de combustibles fossiles pour produire l'énergie nécessaire à la fabrication de produits tels que le ciment, le fer, l'acier, les composants électroniques, les matières plastiques, les vêtements et d'autres biens. L'exploitation minière et d'autres processus industriels libèrent également des gaz, tout comme l'industrie de la construction. Les machines utilisées dans les processus de fabrication fonctionnent généralement au charbon, au pétrole ou au gaz et certains matériaux, comme les plastiques, sont fabriqués à partir de produits chimiques issus de combustibles fossiles. L'industrie manufacturière est l'une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre dans le monde.

1.3.2.3. Abattage de forêts

L'abattage de forêts pour faire place à des exploitations agricoles ou à des pâturages, ou pour d'autres raisons, entraîne des émissions. En effet, les arbres, une fois coupés, libèrent le carbone qu'ils ont stocké. Chaque année, environ 12 millions d'hectares de forêt sont détruits. Étant donné que les forêts absorbent le dioxyde de carbone, leur destruction limite également la capacité de la nature à empêcher les émissions dans l'atmosphère. La déforestation, associée à l'agriculture et à d'autres changements d'affectation des sols, est à l'origine d'environ un quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

1.3.2.4. Utilisation de moyens de transport

Les voitures, les camions, les navires et les avions sont pour la plupart alimentés par des combustibles fossiles. De ce fait, les transports constituent une source importante d'émissions de gaz à effet de serre et notamment de dioxyde de carbone. La majeure partie est imputable aux véhicules routiers, en raison de la combustion de produits dérivés du pétrole, comme l'essence, dans des moteurs à combustion interne. Toutefois, les émissions des navires et des avions continuent de croître. Les transports sont à l'origine de près d'un quart des émissions mondiales de dioxyde de carbone liées à l'énergie et les tendances laissent présager une augmentation importante de la consommation d'énergie dans ce secteur au cours des années à venir.

1.3.2.5. Production de denrées alimentaires

La production de denrées alimentaires entraîne des émissions de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres gaz à effet de serre de diverses manières, notamment à travers la déforestation et le défrichage des terres pour l'agriculture et le pâturage, la digestion des bovins et des ovins, la production et l'utilisation d'engrais et d'effluents d'élevage pour les cultures, et l'utilisation d'énergie pour faire fonctionner les équipements agricoles ou les bateaux de pêche, généralement au moyen de combustibles fossiles. En raison de tous ces éléments, la production de denrées alimentaires constitue un facteur important du changement climatique. En outre, les activités de conditionnement et de distribution des denrées sont également à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre.

1.3.2.6. Alimentation des bâtiments en énergie

À l'échelle mondiale, les bâtiments résidentiels et commerciaux consomment plus de la moitié de l'électricité. Étant donné que le charbon, le pétrole et le gaz naturel continuent d'y être utilisés pour le chauffage et la climatisation, ces bâtiments émettent des quantités importantes de gaz à effet de serre. Ces dernières années, l'accroissement de la demande en énergie pour le chauffage et la climatisation, associé à une augmentation du taux d'équipement en climatiseurs, ainsi que la hausse de la consommation d'électricité pour l'éclairage, les appareils et les dispositifs connectés, ont entraîné une augmentation des émissions de dioxyde de carbone liées à l'énergie dans les bâtiments.

1.3.2.7. Surconsommation

Le logement dans lequel on vit, l'énergie que l'on consomme, le mode de déplacement que l'on utilise, ce que l'on mange et la quantité de déchets que l'on met au

rebut sont autant d'éléments qui contribuent aux émissions de gaz à effet de serre. Il en va de même des biens que l'on consomme, tels que les vêtements, les appareils électroniques et les matières plastiques. Une grande partie des émissions mondiales de gaz à effet de serre est liée aux particuliers. Nos modes de vie ont une incidence profonde sur notre planète. Les personnes les plus riches portent la plus grande responsabilité : ensemble, celles qui constituent le 1 % le plus aisé de la population mondiale sont à l'origine de plus d'émissions de gaz à effet de serre que les 50 % de personnes les plus défavorisées.

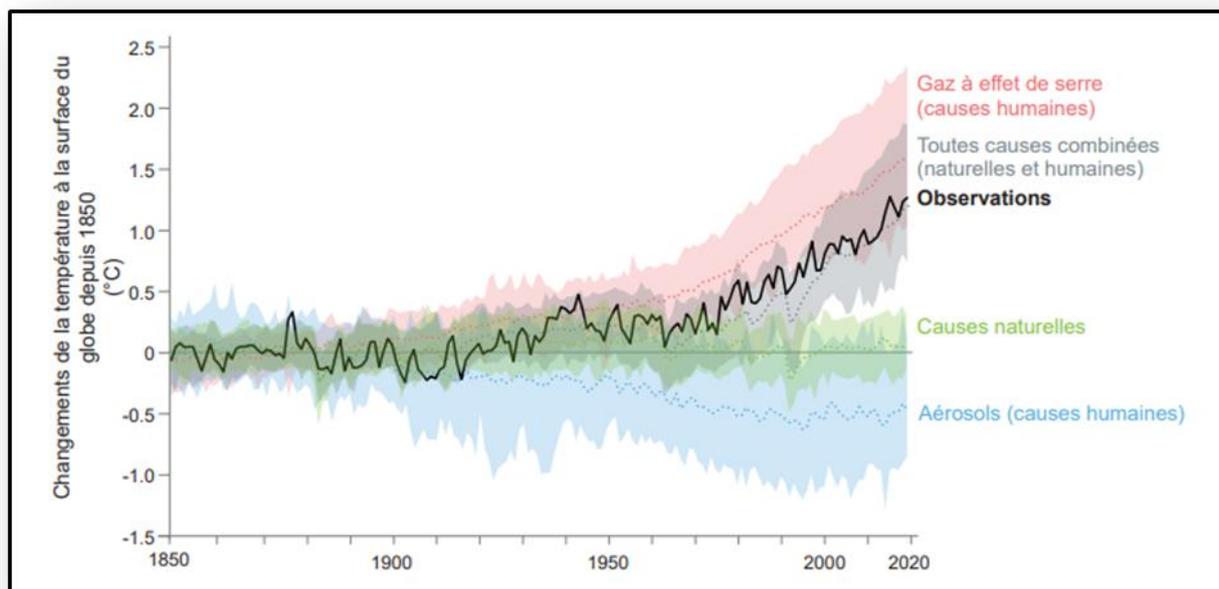


Figure 1. *Changement de la température à la surface du globe (1850-2020).*

(Source : <https://www.ipcc.ch>)

1.4. Le réchauffement climatique

Selon [8], le réchauffement climatique est une augmentation de la température moyenne à la surface de la terre. Ce réchauffement global de la planète est lié au renforcement de l'effet de serre naturel par l'ajout de quantités massives de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O ...), d'origine anthropique dans l'atmosphère. Ces émissions sont notamment produites par la consommation des énergies fossiles, comme le pétrole ou le charbon. Les impacts sur les systèmes biologiques seront très nombreux (rythme phénologique, variabilité et niveau de production, localisation, lutte contre adventices et maladies, impact des phénomènes climatiques extrêmes...).

1.4.1. Gaz à effet de serre

Certains gaz présents dans notre atmosphère, tels que le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote, agissent comme une couverture isolante autour de la Terre. Ils la réchauffent en rendant plus difficile l'évacuation de la chaleur vers l'espace.

Tout comme l'ajout d'une couverture autour de votre corps vous réchauffe et vous garde au chaud, ou comme les parois d'une serre permettent de maintenir l'air intérieur plus chaud que l'air ambiant. Ce phénomène est appelé l'effet de serre, et les gaz qui piègent la chaleur sont appelés gaz à effet de serre.

L'effet de serre est un processus naturel qui rend la Terre vivable pour les humains : sans l'effet de serre naturel, la température moyenne planétaire serait plus froide d'environ 33 °C (59 °F).

Cependant, depuis le XIXe siècle, les activités humaines ont émis des quantités de plus en plus importantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, principalement en brûlant des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz), mais aussi par l'agriculture et l'abattage de forêts. Ces actions ont renforcé l'effet de serre, provoquant le réchauffement planétaire. Cet excès d'énergie est repris par les différentes parties de la Terre : 91 % sont absorbés par l'océan, 5 % par les terres émergées, 3 % sont convertis en fonte des glaces. Seul 1 % de cette chaleur supplémentaire est absorbé par l'atmosphère. Ce réchauffement a entraîné des modifications de multiples caractéristiques climatiques.

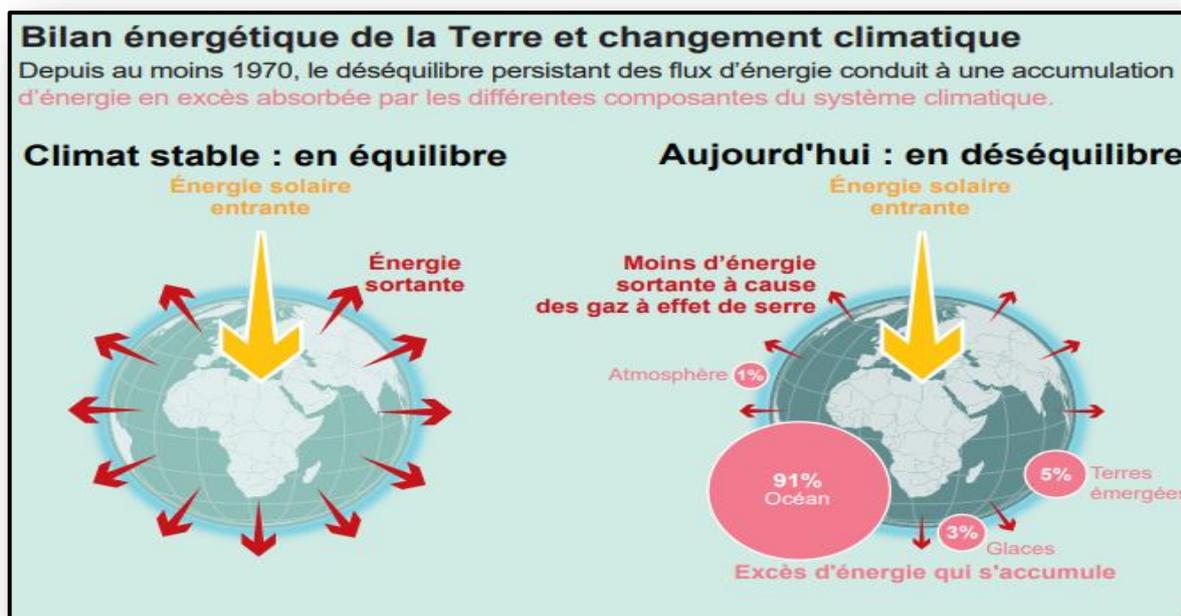


Figure 2. Le bilan énergétique de la Terre compare les flux d'énergie entrants et sortants qui sont déterminants pour le système climatique.

(Source : <https://www.ipcc.ch>)

1.5. Evolution du climat

1.5.1. Dans le monde

Le climat de la Terre change et le climat mondial devrait continuer à changer au cours de ce siècle et au-delà. L'ampleur du changement climatique au-delà des prochaines décennies dépendra principalement de la quantité de gaz à effet de serre (piégeant la chaleur) émise à l'échelle mondiale et de l'incertitude qui subsiste quant à la sensibilité du climat de

la Terre à ces émissions. Avec des réductions significatives des émissions de gaz à effet de serre (GES), l'augmentation annuelle moyenne de la température mondiale pourrait être limitée à 2°C ou moins. Cependant, sans réduction majeure de ces émissions, l'augmentation des températures mondiales moyennes annuelles, par rapport à l'époque préindustrielle, pourrait atteindre 5°C ou plus d'ici la fin de ce siècle.

Le climat mondial continue de changer rapidement par rapport au rythme des variations naturelles du climat qui se sont produites tout au long de l'histoire de la Terre. Les tendances de la température moyenne mondiale, de l'élévation du niveau de la mer, du contenu thermique de la partie supérieure de l'océan, de la fonte des glaces terrestres, de la glace de mer arctique, de la profondeur du dégel saisonnier du pergélisol et d'autres variables climatiques fournissent des preuves cohérentes d'un réchauffement planétaire. Ces tendances observées sont robustes et confirmées par de multiples groupes de recherche indépendants à travers le monde.

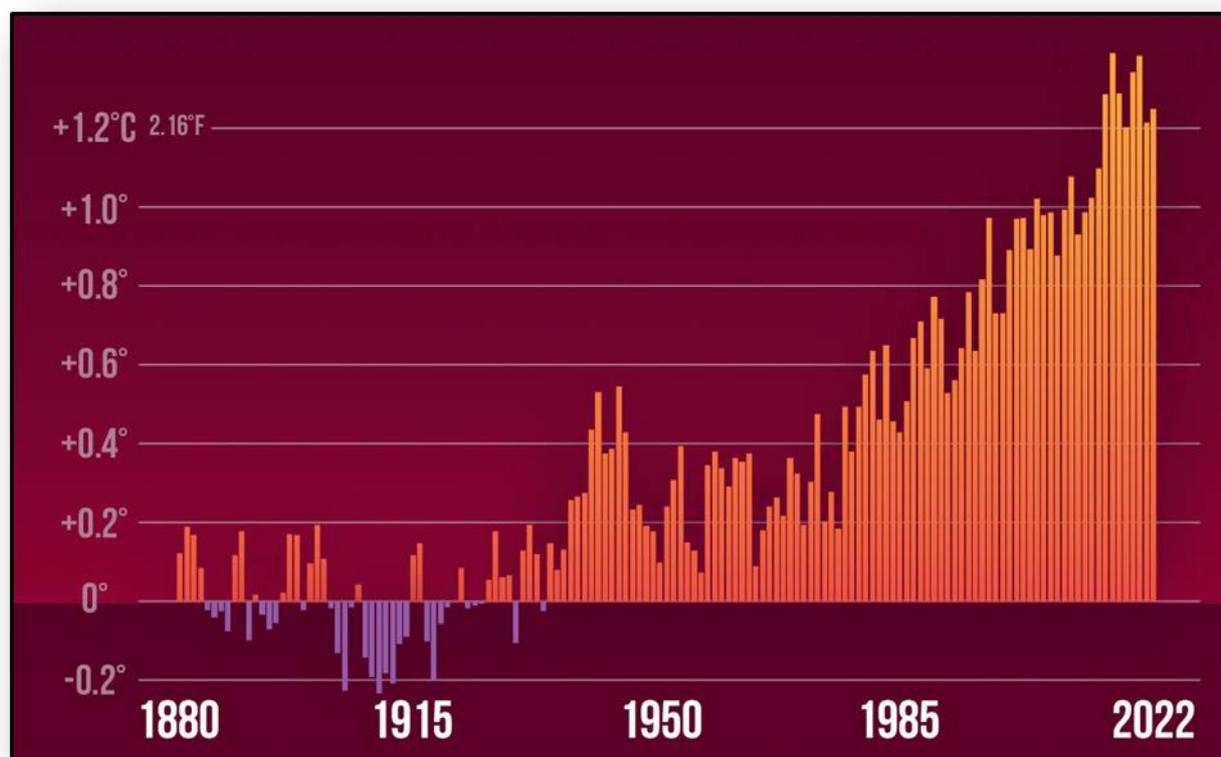


Figure 3. Les températures moyennes annuelles mondiales pour les années 1880-2022.

(Source : <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>)

1.5.2. Dans l'Algérie

Selon [9], l'Algérie se trouve dans une région aride à semi-aride avec un climat méditerranéen dans la partie Nord du fait qu'elle soit située dans le bassin méditerranéen et saharienne dans la partie Sud. Cette situation géographique le rend particulièrement vulnérable aux changements climatiques [10] donc, ce pays est exposé aux effets négatifs

des changements climatiques et des émissions des gaz à effet de serre, notamment les inondations, la sécheresse et les températures élevées [11].

Selon [12], l'Algérie est définie comme une région dont le climat est particulièrement sensible au changement global tant qu'elle connaît déjà des taux élevés de sécheresse et de déficits hydriques.

Selon [13], l'Algérie n'est pas épargnée par l'impact des changements climatiques, elle a connu durant les 25 dernières années, des périodes de sécheresse intenses et persistantes caractérisées par un déficit pluviométrique important évalué à près de 30% sur l'ensemble du pays.

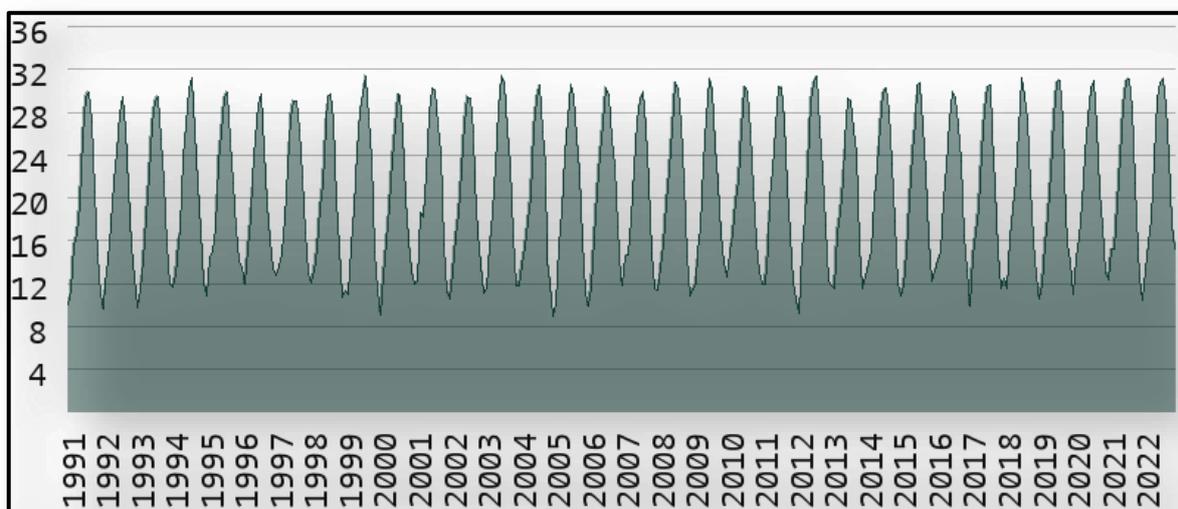


Figure 4. Moyenne de la température en Algérie (1991-2022).

(Source : <https://www.donneesmondiales.com>)

1.6. Impacts des changements climatiques sur l'agriculture

1.6.1. En monde

L'agriculture reste sans aucun doute parmi les activités humaines, une de celles le plus directement influencées par le climat [14].

Selon [15], les impacts du changement climatique sur l'agriculture se traduisent par des processus éco physiologiques qui sont comme suit :

- L'augmentation du CO₂ va stimuler la photosynthèse des couverts végétaux et créer des conditions permettant d'augmenter potentiellement la production de biomasse jusqu'à 20 % pour certaines espèces.
- Des températures plus élevées peuvent être plus favorables pour la plupart des processus physiologiques, à condition de ne pas dépasser l'optimum au de la duquel les valeurs deviennent excessives.
- Les modifications de pluviométrie peuvent s'avérer totalement déterminantes, surtout cas de renforcement des sécheresses.

1.6.2. En Algérie

En Algérie, le changement climatique, caractérisé par une augmentation des températures moyennes et une diminution des précipitations, affecte non seulement la qualité et la résilience des écosystèmes, mais aussi la disponibilité et la qualité des ressources naturelles pour l'économie et les conditions de vie de la société.

En ce sens, le changement climatique et les événements associés posent des défis extrêmement graves pour l'agriculture, la sécurité alimentaire et le développement social et économique du pays. Parmi les systèmes de production mis en œuvre aujourd'hui en Algérie, seules les cultures irriguées (14% des SAU) sont vulnérables au changement climatique à court terme. Leur sensibilité au changement climatique dépendra principalement des ressources en eau à utiliser pour l'irrigation future.

Les modèles agro-climatiques prédisent que le changement climatique en Algérie aura pour effet de modifier le cycle de l'eau contribuant à la dégradation de la fertilité des terres agricoles, à la réduction de la production agricole et à la perte de biodiversité.

Le réchauffement climatique entraînera à l'avenir davantage de modifications du cycle végétatif des plantes et de raccourcissements des saisons agricoles, de déplacement des sols bioclimatiques et d'augmentation des risques parasitaires et sanitaires [16].

À la lumière de ces prévisions, le ministère de l'Agriculture et du Développement rural prévoyait une baisse de 10% du rendement moyen, confirmant le rapport [17] qui faisait état de pertes d'environ 15% à 35% en Afrique du Nord.

[18] on estime que d'ici 2030, le changement climatique entraînera directement une diminution de 15 à 30% de la productivité des légumes en Algérie [19]. Dans les scénarios climatiques défavorables, les pertes de rendement moyennes devraient être plus importantes, de l'ordre de 31% à 39% pour la culture du blé.

Les systèmes pastoraux, qui accueillent une grande partie de la population, sont également particulièrement vulnérables à la désertification. Ceci est le résultat de l'épuisement des sols et de la réduction des ressources en eau. Dans les plateaux steppiques algériens, les précipitations particulièrement faibles sont les principales raisons de la fragilité de ces milieux. Les disponibilités fourragères naturelles deviennent de plus en plus aléatoires.

Des études du ROSELT dans les steppes du Sud algérois ont montré une perte de la production pastorale équivalente à 236 UF/ha pour une diminution de la pluviosité annuelle de 104 mm/an. On assiste à la disparition de l'alfa alors que cette plante représentait 80 % du couvert végétal du système préexistant, cette disparition étant bien entendu encore plus rapide dans les parcelles pâturées. De plus, les pratiques culturales inadaptées font que les superficies labourées annuellement et soumises à l'érosion éolienne sont estimées à près de

1,2 millions d'ha [20]. La récurrence des cycles de sécheresse, devenus de plus en plus longs, accentue cette désertification.

1.7. Impacts du changement climatique sur la céréaliculture :

Dans la première partie de cette étude, nous avons montré que la plupart des cultures cultivées en Algérie étaient des cultures céréalières récoltées par la pluie (en sec et en terres « Bour »).

Cependant, la céréaliculture est un système de culture plus vulnérable qui dépend fortement des risques climatiques et des niveaux de précipitations. Diverses études récentes ont montré des effets négatifs sur les rendements et la production céréalière en Algérie, à travers le changement climatique.

Face à cette situation, une étude sur les effets du changement climatique sur les rendements du blé d'hiver d'ici 2020, présentée dans le cadre des premières communications nationales de trois pays du Maghreb, l'Algérie, le Maroc et la Tunisie, a révélé des effets très négatifs, entraînant des baisses progressives mais durables des rendements en blé. Ces études étaient basées sur l'introduction de hausses de températures et de baisses mensuelles des taux d'altitude fournis par les scénarios climatiques dans le modèle de simulation CropWat de la FAO.

1.7.1. Impact du réchauffement futur

Les scientifiques ont montré que l'être humain est responsable en très grande proportion du réchauffement climatique dans le monde au cours des 200 dernières années. Les activités humaines, telles que celles mentionnées ci-dessus, sont la cause des émissions de gaz à effet de serre qui réchauffent le globe plus vite que jamais auparavant au cours de 2000 dernières années. En conséquence, la température à la surface du globe est actuellement supérieure de 1,1 °C par rapport à la température enregistrée dans les années 1800, avant la révolution industrielle.

La dernière décennie (2011-2020) a été la plus chaude jamais enregistrée et chacune des décennies précédentes a été plus chaude qu'aucune autre décennie depuis 1850. Les études indiquent que l'intensité des réponses des phases phénologiques des cultures aux changements climatiques est variable dans l'espace et dans le temps [21] [22].

Le réchauffement futur à travers le Bassin Méditerranéen raccourcit le cycle de croissance du blé dur [23] [24] [25] [26]. La conséquence de ce raccourcissement sur l'accumulation de biomasse et sur le rendement en grain ne sera négative qu'à partir d'un réchauffement de 2 °C [26].

1.7.2. Effets d'une atmosphère riche en CO₂

L'une des manifestations les plus marquantes du changement climatique est l'élévation du taux de CO₂ dans l'air, qui est passé approximativement de 280 ppm à 379 ppm durant le dernier siècle et qui est censé atteindre 570 ppm en 2050 [27]. Cette hausse aura un effet bénéfique sur le couvert végétal en favorisant l'activité photosynthétique des plantes.

L'étude de [28] montre qu'une augmentation de 20 à 30 % conduirait à une assimilation nette de 10 à 20 % plus élevée en fonction du métabolisme photosynthétique.

Différentes recherches ont montré l'effet fertilisant de l'augmentation du taux de CO₂ sur la croissance des cultures et leur rendement.

Chez le blé dur, l'augmentation du taux de CO₂ provoque deux effets différents : une augmentation du taux de CO₂ intercellulaire induisant une augmentation de la photosynthèse, et la réduction de la conductance stomatique provoquant une réduction de la transpiration dont le résultat est une croissance de l'efficacité d'utilisation de l'eau [29].

L'élévation du taux de CO₂ (700 ppm) accélère le taux d'élongation de la tige et le développement du limbe chez le blé dur [30].

Conclusion

L'identification des conséquences des CC sur l'économie et la société algérienne constitue une priorité. D'une part, une adaptation pertinente au CC requiert d'anticiper leurs effets. D'autre part, atténuer les GES, doit permettre de contribuer à l'effort mondial à limiter autant que possible ces conséquences

II.1. Importance des céréales

II.1.1 Importance de la céréaliculture dans le monde

Les produits céréaliers constituent la base de l'alimentation humaine dans la plupart des pays du monde du fait qu'elles apportent la plus grande part calorique et protéique de la ration alimentaire. Ils sont principalement destinés à l'alimentation humaine (à hauteur de 75 % de la production) et assurent 15 % des besoins énergétiques. Elles servent également à l'alimentation animale (15% de la production) et même à des usages non alimentaires [31].

La céréaliculture continue d'être un secteur économique vital dans de nombreux pays, fournissant des denrées alimentaires de base pour la population mondiale et des matières premières pour d'autres industries.

Les céréales ont constitué la base principale de l'alimentation de ces premières civilisations ; riz ; pour les civilisations Asiatiques, blé ; pour celle des bassins Méditerranéens et du Proche-Orient [32].

La FAO (2020) a estimé une superficie moyenne annuelle de 18 millions d'hectares consacrée seulement pour le blé dur, cette superficie représente 8 à 10% du total des terres réservées aux blés.

Tableau 1. Les grands pays producteurs du blé dans la période 2010-2020.

| Années Pays | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Australie | 15729 | 20301 | 21511 | 17609 | 20061 | 19172 | 19743 | 26100 | 19178 | 16917 | 14681 |
| Canada | 28085 | 29568 | 28743 | 35980 | 30818 | 28925 | 35805 | 33815 | 32742 | 33835 | 35120 |
| Chine | 47484 | 48374 | 49868 | 50553 | 52433 | 53923 | 53961 | 54838 | 54163 | 56294 | 57417 |
| France | 70405 | 66563 | 71512 | 72656 | 73530 | 78008 | 52896 | 72538 | 67680 | 77428 | 66803 |
| Inde | 28395 | 29886 | 31775 | 31538 | 31457 | 27496 | 30339 | 31999 | 33682 | 35334 | 34311 |
| Pakistan | 25528 | 28328 | 27138 | 27957 | 28241 | 27256 | 27790 | 29729 | 28505 | 28059 | 28675 |
| Iraq | 19872 | 19552 | 24181 | 23068 | 23964 | 28617 | 33181 | 28392 | 27789 | 28144 | 29105 |
| Ukraine | 26816 | 33533 | 27999 | 33931 | 40119 | 38792 | 42056 | 41097 | 37242 | 41566 | 37950 |
| E-Unis | 31167 | 29422 | 31154 | 31673 | 29378 | 29299 | 35408 | 31175 | 32005 | 34746 | 33415 |

(Source : FAO, 2020)

II.1.2. Importance de la céréaliculture en Algérie

Les produits céréaliers occupent une place stratégique dans le système alimentaire et dans l'économie nationale [33].

La superficie ensemencée en céréales durant la décennie 2000-2009 est évaluée à 3 200 930 ha, desquelles, le blé dur et l'orge occupent la majeure partie de cette superficie avec 74% de la sole céréalière totale.

Durant la période 2010-2017, cette superficie a atteint en moyenne 3 385 560 ha, en évolution de 6% par rapport à la période précédente (2000-2009).

Durant les deux périodes 2000-2009 et 2010-2017, la superficie des céréales occupe en moyenne annuelle 40% de la Superficie Agricole Utile (SAU).

Le secteur de l'agriculture occupe la troisième place après les services et les hydrocarbures, il a contribué à hauteur de 12,3 % de la valeur ajoutée dans le PIB en 2016 en augmentation de 1.2% par rapport à 1999 [33].

II.2.1. La production des céréales en Algérie

La production réalisée des céréales au cours de la période 2010-2017 est estimée à 41.2 Millions de quintaux en moyenne, soit un accroissement de 26% par rapport à la décennie 2000-2009 où la production est estimée en moyenne à 32.6 Millions de quintaux.

La production est constituée essentiellement du blé dur et de l'orge, qui représentent respectivement 51% et 29% de l'ensemble des productions de céréales en moyenne 2010-2017 [33].

Les céréales en Algérie occupent une superficie de 3,3 millions d'hectare, et la moyenne de la production sur les cinq dernières années ne dépasse guère 42 millions de quintaux [34].

Tableau 2. Rendement (en hg/ha) des céréales en Algérie entre les années 2010 et 2020.

| Années Céréales | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Blé | 14838 | 17405 | 17639 | 19100 | 14753 | 14640 | 11833 | 11501 | 20433 | 19630 | 16811 |
| Orge | 14762 | 14760 | 15446 | 16694 | 11863 | 12844 | 7441 | 7441 | 18119 | 14543 | 12403 |
| Mais | 25827 | 23374 | 25583 | 33649 | 26165 | 39242 | 45129 | 13007 | 44416 | 41539 | 60774 |
| Avoine | 12428 | 12921 | 12869 | 13499 | 8731 | 10016 | 9416 | 7290 | 15253 | 13050 | 11128 |

(Source : Algérie-eco, 2022)

II.2.2. Consommation du blé en Algérie

Actuellement, le pays se classe au premier rang mondial pour la consommation de blé avec une moyenne dépassant largement les 200 kg/hab/an, comparativement à l'Égypte dont la moyenne est de 131 kg/hab/an et à la France dont la moyenne est de 98 kg/hab/an [35].

La production de céréales ne couvre que 30% des besoins des algériens [34].

II.2.3. Les importations du blé en Algérie

L'Algérie est classée troisième importateur mondial des céréales après le Brésil et l'Égypte. A titre indicatif, la quantité de blé importé pour la saison 2005-2006 a atteint 5,5 millions de tonne [36]. Alors que la production pour la même saison a été de 17,7 millions de quintaux, cette production a chuté jusqu'à 8,1 millions de quintaux en 2008.

Le déficit enregistré est comblé par les importations. Plusieurs sources concordantes indiquent que la facture d'importation des céréales est lourde de conséquence, soit plus de 1.8 milliards de dollars en 2020. L'importation du blé (dur et tendre) a représenté 65% des importations des céréales, dont le blé tendre représente 70% de l'importation du blé [34].

II.3. La culture de blé dur

II.3.1 Stades de développement du blé dur

II.3.1.1. La période végétative

Elle se caractérise par un développement strictement herbacé et s'étend du semis jusqu'à fin tallage, et se divise en deux phases :

II.3.1.1.1. La phase germination – levée

Les conditions requises étant réalisées (température, humidité, etc.), le grain de blé va germer. Quelques jours plus tard apparaît la première manifestation importante de la jeune plante en développement, une sorte d'acte de naissance : l'épointement de la radicule (la jeune racine déjà présente dans l'embryon).

La germination de la graine se caractérise par l'émergence du coléorhize donnant naissance à des racines séminales et de la coléoptile qui protège la sortie de la première feuille fonctionnelle. La levée se fait réellement dès la sortie des feuilles à la surface du sol. Au sein d'un peuplement, la levée est atteinte lorsque la majorité des lignes de semis sont visibles [37].

II.3.1.1.2. Phase levée-tallage

La production de talles commence à l'issue du développement de la troisième feuille [38]. Du stade 3 feuilles « épi » 1 cm, ce sont des tiges latérales appelée talle qui sont des « épis potillles ». A un même niveau de la base de la tige il se formera une touffe herbacée et commencera alors la période dite de « montaison ». La fin du tallage représente la fin de la période végétative, elle marque le début de la phase reproductive, conditionnée par la photopériode et la vernalisation qui autorisent l'élongation des entre-nœuds.

Au cours de cette étape, il y a ramification de la tige, apparition de nouvelles racines (adventives), de nouvelles feuilles sur chaque tige puis s'effectuent la montée des tiges. C'est un mode de développement propre aux graminées, il est caractérisé par deux stades principaux :

a) Stade de formation du plateau de tallage

C'est le phénomène de "pré tallage" dans lequel le deuxième entre nœud qui porte le bourgeon terminal s'allonge à l'intérieur de la coléoptile, il stoppe sa montée à 2 centimètres

sous la surface quelle que soit la profondeur du semis, à ce niveau il y aura l'apparition d'un renflement : c'est le futur plateau de tallage.

b) Stade d'émission des talles

À l'aisselle des premières feuilles du blé des bourgeons axillaires entre alors en activité pour donner de nouvelles pousses : les talles. Dans cette phase, la plante se base dans leur alimentation sur les ressources de la graine et l'azote du sol parce que ses besoins sont faibles en éléments minéraux notamment l'azote jusqu'au stade 2-3 feuilles. Une alimentation azotée limitant pour la plante se manifeste simultanément par l'interruption du processus de tallage herbacé et par une réduction de la croissance des talles existantes.

II.3.1.2. La période reproductrice

II.3.1.2.1. La phase montaison et le gonflement

La montaison débute à la fin du tallage, elle est caractérisée par l'allongement des entre-nœuds et la différenciation des pièces florales. A cette phase, un certain nombre de talles herbacées commence à régresser alors que, d'autres se trouvent couronnées par des épis. Pendant cette phase de croissance active, les besoins en éléments nutritifs notamment en azote sont accrus [39]. La montaison s'achève à la fin de l'émission de la dernière feuille et des manifestations du gonflement que provoquent les épis dans la gaine.

II.3.1.2.2. La phase épiaison – floraison

Elle est marquée par la méiose pollinique et l'éclatement de la gaine avec l'émergence de l'épi. C'est au cours de cette phase que s'achève la formation des organes floraux (l'anthèse) et s'effectue la fécondation. Cette phase est atteinte quand 50 % des épis sont à moitié sortis de la gaine de la dernière feuille [37]. Elle correspond au maximum de la croissance de la plante qui aura élaboré les trois quarts de la matière sèche totale et dépend étroitement de la nutrition minérale et de la transpiration qui influencent le nombre final de grains par épi.

II.3.1.3. La période de formation et maturation des grains

La phase de maturation succède au stade pâteux (45% d'humidité). Elle correspond à la phase au cours de laquelle le grain va perdre progressivement son humidité en passant par divers stades [37]. Elle débute à la fin du palier hydrique marqué par la stabilité de la teneur en eau du grain pendant 10 à 15 jours. Au-delà de cette période, le grain ne perdra que l'excès d'eau qu'il contient et passera progressivement aux stades « rayable à l'angle » (20% d'humidité) puis, « cassant sous la dent » (15-16% d'humidité). Cette phase de maturation dure en moyenne 45 jours. Les graines vont progressivement se remplir et passer par différents stades :

II.3.1.3.1. La phase de grossissement du grain

Phase de la maturité laiteuse

Ce stade est caractérisé par la migration des substances de réserves vers le grain et la formation des enveloppes. Le grain est de couleur vert clair, d'un contenu laiteux et atteint sa dimension définitive.

II.3.1.3.2. La phase de maturation

II.3.1.3.2.1. Phase maturité pâteuse

Durant cette phase, les réserves migrent depuis les parties vertes jusqu'aux grains. La teneur en amidon augmente et le taux d'humidité diminue. Quand le blé est mûr le végétal est sec et les graines des épis sont chargées de réserves.

II.3.1.3.2.2. Phase maturité complète

Après le stade pâteux, le grain mûrit, se déshydrate. Il prend une couleur jaune, durcit et devient brillant. Ce stade est sensible aux conditions climatiques. Début du stade pâteux : contenu de la graine est encore tendre. A maturation le grain est dur.

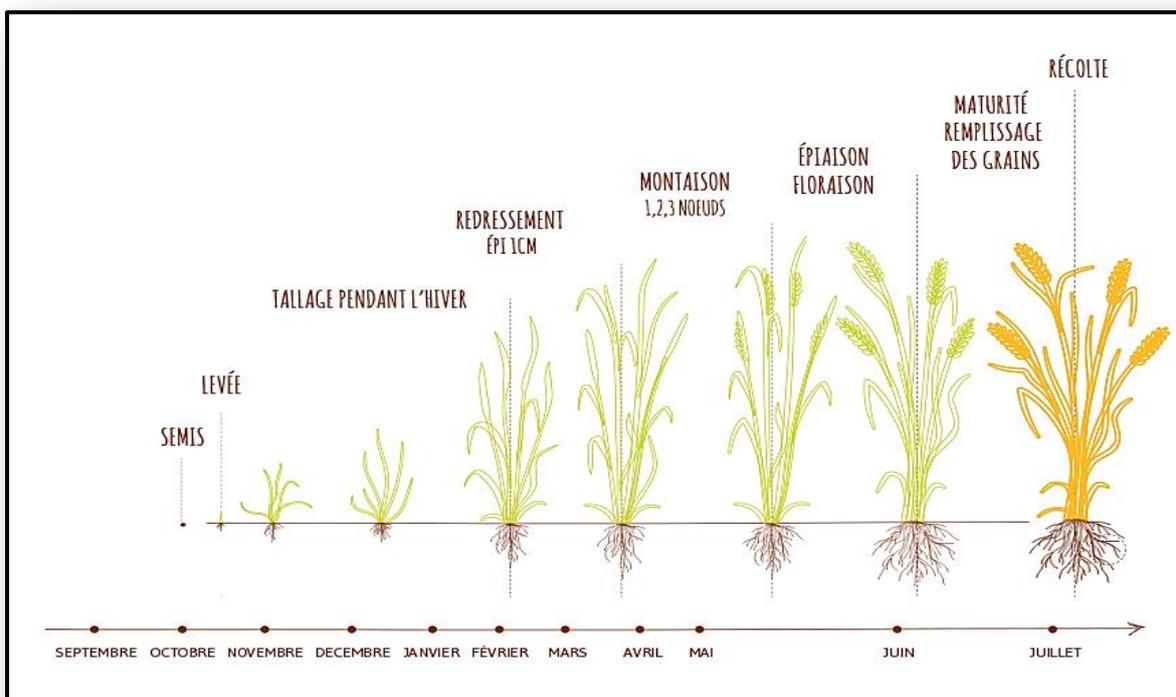


Figure 5. Stades de développement du blé.

(Source : <https://www.vivescia.com>)

II.4. Exigences de blé dur

II.4.1. Exigences climatiques

II.4.1.1. Température

La température minimale permettant le déclenchement de la germination est 4 °C, la fourchette idéale se situant entre 12-25 °C. La germination s'accélère lorsque les températures se rapprochent de 18-20 °C.

En zone des Hauts-Plateaux, les basses températures qui coïncident avec le stade floraison (gelées printanières) sont à craindre, car elles provoquent la coulure des fleurs et affectent le rendement de la culture.

Les hautes températures sèches (vents chauds), coïncidant avec le stade remplissage des grains, provoquent l'échaudage, affectant ainsi le rendement et la qualité du grain [40].

II.4.1.2. Lumière

Une certaine durée du jour (photopériodisme environ 12 heures) est nécessaire pour la réalisation du Stade d'émission des talles [41].

Quant à l'intensité lumineuse, et à l'aération, elles agissent directement sur l'intensité de la photosynthèse, dont dépendent à la fois, la résistance des tiges à la verse et le rendement [41].

II.4.1.3. Eau

Selon [40], la consommation totale en eau du blé pour un rendement attendu de plus de 60 q/ha est de 450 à 600mm.

La période végétative (semis à début montaison) est moins sensible que la période reproductrice. C'est à partir de la fin montaison que la plante commence à souffrir de la rigueur du climat sec. La période critique se situe entre le stade fin montaison et le stade grain laiteux, puisqu'une sécheresse survenant à cette période peut réduire les rendements en grains d'environ 70% [42].

II.4.2. Exigences édaphiques

Le blé prospère sur une gamme assez variée de sols, les meilleures terres de blé sont les terres de limon argilo-calcaires et argilo-siliceuses [43]. [41] détermine trois caractéristiques pour une bonne terre à blés :

- Une texture fine, argilo-limoneuse, qui assurera aux racines fasciculées du blé une grande surface de contact, et partant une bonne nutrition.
- Une structure stable, qui résiste à la dégradation par les pluies d'hiver. Le blé n'y souffrira pas d'asphyxie et la nitrification sera bonne au printemps.
- Une bonne profondeur, et une richesse suffisante en colloïdes, afin d'assurer la bonne nutrition nécessaire aux gros rendements.

II.5. Techniques culturales

II.5.1. Préparation de lit de semence

La préparation du sol doit permettre d'obtenir un lit de semences avec peu de grosses mottes pour s'assurer d'une bonne levée et en prévision des passages de herse étrille [44].

II.5.1.1. Labour profond

II.5.1.1.1. Labour

Il est l'opération la plus mécanisée et elle est basée sur l'utilisation de charrues pour les labours et d'outils pour la reprise du travail et pour la préparation du lit de semences.

Généralement réalisé en automne après les premières pluies, le labour est une technique de travail du sol, ou plus précisément de la couche arable d'un champ cultivé, qui consiste à retourner la terre sur une profondeur comprise entre 25 et 30 cm, avec une charrue à disques ou à socs permettant l'augmentation des réserves hydriques en profondeur du sol, l'amélioration de la fertilité naturelle du sol par la restitution et l'enfouissement des résidus de récolte et la réduction de l'infestation des adventices ainsi que la diminution de l'évaporation du sol. En conditions de sol sec, sur sols légers et peu profonds, on utilise le chisel pour remplacer la charrue à socs, travaillant ainsi le sol moyennement [45].

II.5.1.1.2. Orientation du labour

Sur les terrains plats bien drainés, l'orientation du labour peut être réalisée dans n'importe quelle direction. Et sur les terrains en pente, il est recommandé de travailler le sol perpendiculairement au sens de la pente, afin d'éviter les problèmes d'érosion [45].

II.5.1.1.3. Reprise du labour

Cette opération succède au labour pour compléter la préparation du sol, tout en diminuant le volume des mottes. Elle permet aussi de mélanger les débris végétaux à une profondeur comprise entre 10 et 15 cm. Les outils utilisés sont le pulvérisateur (cover-crop) ou le cultivateur à dents. Ce dernier est préconisé en sols secs et sur sols peu profonds afin de limiter l'émiettement excessif du sol et l'érosion. [40]

La qualité du labour dépend de l'état du sol (taux d'humidité), de sa profondeur, de sa texture et du réglage de la charrue [45].

II.5.1.2. Rôle de travail du sol

La valorisation des facteurs de développement (semences, mode de semis, irrigation, désherbage chimique, fertilisation, etc..) dépend en grande partie du travail du sol [45].

L'avantage du travail du sol d'été consisté à profiter au mieux de l'évolution naturelle de l'état structural du sol obtenu après le labour, grâce à l'action du climat.

II.5.2. Semis

II.5.2.1. Les éléments à contrôler sont

- Semences certifiées ou traitées ;

- Variétés appropriées pour les conditions locales ;
- Préparation du lit de semence ;
- Profondeur de semis ;
- Date et densité de semis appropriées ;
- Réglage du semoir ;
- Tassement du sol autour des semences pour un bon ;
- Semis sur sol ressuyé.

II.5.2.2. Choix de la variété - Les variétés du blé dur

La sélection de la variété la plus appropriée pour un champ donné est l'un des facteurs critiques affectant les chances de réussite de la culture du blé.

Depuis 9 000 ans, les agriculteurs et les scientifiques cherchent à créer, à contrôler, à tester et à sélectionner des variétés de blé nouvelles et améliorées afin de s'adapter à l'évolution des normes, des besoins et des techniques de culture et de répondre à la demande du marché [46].

A l'état actuel, un nombre total de 173 variétés de céréales autorisées à la production et à la commercialisation est mis à la disposition des céréaliculteurs.

Avec la contribution de l'ITCG, 23 nouvelles variétés ont été inscrites sur la liste des variétés autorisées à la production et à la commercialisation en Algérie, dont 11 sont du blé dur.

Les nouvelles variétés de céréales sont obtenues essentiellement pour remplacer les variétés les plus anciennes, les moins utilisées et les moins productives chez les agriculteurs.

Il existe au total 60 variétés homologuées, néanmoins, seulement 17 variétés sont produites en semences de base et de prébase avec 6 variétés qui occupent à elles seules 84% de la superficie céréalière du programme de blé dur, dont :

1. Vitron occupant 27%.
2. Boussallem occupant 19%.
3. Simeto occupant 14%.
4. Chen's occupant 9%.
5. Waha occupant 8%.
6. Gta dur occupant 7%.

Durant la dernière décennie (2010-2020), plusieurs nouvelles variétés sont progressivement introduites en production de semence en tenant en considération l'aspect du zonage agro-climatique et la spécificité de chaque région. En effet, et à titre d'exemple, les variétés Megress, Aïn Lehma, et Targui occupent de plus en plus de superficies en blé dur et elles sont en plein essor dans les wilayas de Sétif, Constantine et Blida, respectivement [47].

Tableau 3. Caractéristiques de quelques variétés du blé dur en Algérie.

| Variétés | Caractéristiques Morphologique | Caractéristiques Technologiques | Productivité | Zone D'adaptation | Conseil de culture |
|----------|--------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|
|----------|--------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|

| | | | | | |
|------------------------|---------------------------------|--|-------|---|--|
| Chen's | Paille courte | Résistante aux maladies cryptogamiques et à la verse | Bonne | Mieux adaptée aux régions arides, semi arides et sahariennes (< 150 mm) | Cycle végétatif précoce |
| Boussalem | Grain lâche | Bonne résistance au froid, la verse et à la sécheresse avec une résistance à la moucheture | Bonne | Hauts plateaux | Cycle végétatif mi-tardif |
| Vitron (Hoggar) | Grain roux, moyen | Légèrement sensible au mitadin et à la moucheture. PMG élevé | Bonne | Hauts plateaux et zones sahariennes | Précoce de type hiver. Semis : Novembre |
| Waha | Grain clair ambré à roux, moyen | Bonne résistance à la moucheture et au mitadin. PMG moyen | Bonne | Hauts plateaux et plaines intérieures | Précoce de type printemps. Semis : de la mi-novembre à la mi-décembre. |

(Source : *Abdelguerfi et Laouar, 2000, modifié*)

II.4.3.2.3. Profondeur de semis

Les graines doivent être placées à une profondeur homogène de 2 à 4 cm. En conditions sèches, il est recommandé de semer à une profondeur de 3 à 6 cm [40].

La réalisation du semis est préconisée sur un sol propre, souple et bien ressuyé, à une profondeur de 2 à 4 cm suivant le type de sol (plus le sol est léger, plus la graine doit être mise en profondeur). La régularité de la profondeur du semis (régularité de la levée) est primordiale pour une bonne gestion des interventions de travail du sol à suivre, désherbage à la herse étrille notamment, et un atout pour une meilleure récolte. La vitesse de semis doit être d'environ 3 à 4 km/heure pour avoir un pourcentage de levée maximum [48].

- Un semis trop profond est à déconseiller car la coléoptile est obligée de s'allonger pour permettre aux premières tiges feuillées de sortir, de même pour le rhizome qui va s'allonger pour amener le plateau de tallage à la surface. Plus ce dernier est allongé, plus il est fin et plus il est plus fragile et craint le gel hivernal. Ce risque est moins élevé pour les blés durs de printemps. Mais si ces derniers sont semés trop profondément, il y a une perte de temps et d'énergie par les plantules [48].
- Un semis trop peu profond entraîne des risques de mauvais enracinements et par conséquent des dégâts lors du passage de la herse étrille [48].

II.4.3.2.4. Date de semis

Elle varie du type de la variété et de la zone de culture. La période de semis optimale se situe entre mi-novembre et mi-décembre. Les variétés tardives sont semées plus tôt que les variétés précoces. Les semis sont relativement précoces en zones littorales et sub-littorales et relativement tardifs en zones des Hauts-Plateaux [40].

Les variétés de blé dur que l'on cultive sont toutes alternatives : leur développement dépend essentiellement de la température, il n'y a pas, ou très peu, de frein lié à la durée du jour. Si l'hiver est long et froid, les stades seront retardés. A l'inverse, si l'hiver est doux, le blé dur devient très précoce, ce qui l'expose plus fortement aux gels printaniers.

Pour répartir les risques, il est conseillé de semer un bouquet de variétés de différentes précocités.

Le potentiel de rendement maximal du blé dur est généralement atteint pour des semis réalisés entre le 20 octobre et le 20 novembre.

Nous observons, depuis les dernières années, une accentuation des problématiques de désherbage dans notre région (vulpins et ray-grass), avec des solutions plus réduites en lien notamment avec la recrudescence de résistances aux solutions foliaires de sortie d'hiver. Eviter les semis trop précoces restent un levier efficace et opérationnel.

Selon les précocités à montaison et à épiaison des variétés, leur optimum de date de semis peut légèrement varier.

Une fois l'optimum de date de semis connu il est nécessaire de s'assurer d'être dans de bonnes conditions de semis qui sont elles aussi décisives. Le blé dur est plus sensible que le blé tendre à une mauvaise structure car son enracinement est moins performant en situation difficile [49].

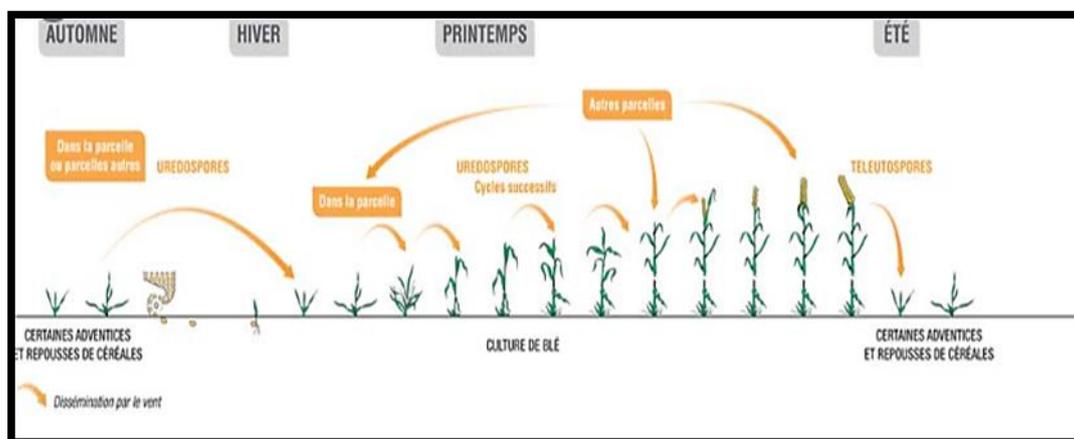


Figure 6. Les dates de semis de blé.

(Source : <https://www.syngenta.fr>)

La période idéale de semis est courte et un semis précoce est la première condition de réussite d'un blé dur : meilleur enracinement, plus d'épis plus fertiles, moins d'échaudage.... [50]

II.4.3.2.5. Densité de semis

Plus on sème tôt et sur un sol bien préparé, plus on peut économiser de semences [50].

En fonction des espèces, la densité de peuplement souhaitée/m² doit tenir compte des conditions initiales du sol au semis, de la date de semis et des conditions climatiques de la région. D'une manière générale, si les sols présentent des obstacles ou bien si les dates de semis sont tardives, il est vivement recommandé de majorer la densité de semis de 20 à 25% par rapport aux doses préconisées en conditions optimales pour la même région

Augmenter considérablement la densité de semis n'améliore pas le rendement, par contre une densité de semis réduite permet de limiter significativement une partie des risques agronomiques. Une densité de semis importante induit des risques en termes de la verse physiologique et d'infestation par des maladies fongiques [45].

Varie entre 110 kg/ha et 180 kg/ha (en fonction de la grosseur du grain, 330 à 450 grains par m²).

A cause d'un taux de pertes hivernales important (passages de la herse-étrille) et d'un tallage limité, la densité de semis doit être plus élevée en bio (10 à 15%). La densité dépend également de la date de semis : on l'augmentera lorsqu'on avance dans l'année.

Dans de bonnes conditions la levée se fait entre 10 et 15 jours (20 max.). Le roulage consécutif au semis favorise la germination de la céréale (échanges terre/graine) et donne un sol nivelé adapté au passage de la herse-étrille [48].

Elle est calculée en fonction du poids de 1000 grains et de la faculté germinative des semences utilisées. Il est recommandé de semer à une densité de 350 à 400 grains/m², correspondant à une dose de semis de 120 à 140 kg par hectare. L'écartement entre les lignes de semis est de 18 à 20 cm [40].

II.5. Besoins en eau

II.5.1. Importance et rôle de l'eau dans le végétal

L'eau est un besoin vital pour le développement de tout végétal. L'eau est indispensable à toute vie, il est le constituant [pondérément] le plus important des végétaux supérieurs puisqu'elle représente 60 à 80% de leur poids en matière fraîche [51].

L'eau est impliquée aussi bien dans les structures que dans les processus de transports et de métabolisme des végétaux. Elle est le milieu dans lequel ont lieu la quasi-totalité des processus biologiques ; elle joue le rôle de transporteur, de solvant, d'agent de réactions chimiques ; elle donne aux plantes leur turgescence. La transpiration permet aussi de perdre une partie de l'énergie qu'elles reçoivent et d'éviter ainsi un réchauffement excessif [52].

II.5.2. Les besoins en eau du blé

Tout d'abord, le besoin d'eau reste conditionné par l'optimisation des autres facteurs tels que :

- La préparation du sol.
- Les semis en ligne.
- La densité optimale.
- La fertilisation.

- L'application des pesticides.

Phase semis-levée : Les besoins en eau sont faibles et généralement satisfaits par les pluies. Cependant, la sécheresse peut entraîner un retard dans la germination ou dans la levée.

Phase tallage : Les besoins en eau deviennent importants du stade début tallage au stade fin tallage de la plante.

Phase montaison : Les besoins en eau sont très importants. L'épi 1 cm marque la fin du tallage herbacé et le début de l'élongation des entre-nœuds de la tige principale. A partir de cette phase, le blé devient sensible aux variations de la température et surtout à la sécheresse qui affecte considérablement les principales composantes du rendement. Au stade gonflement, les températures supérieures à 25°C peuvent pénaliser la fertilité du pollen et la sécheresse peut handicaper la formation des fleurs, donc le nombre de grains par épi.

Phase épiaison-floraison : Les besoins en eau sont considérables durant cette période. A l'épiaison, le déficit hydrique affecte la croissance des épis alors qu'à la floraison, il peut provoquer l'avortement des épis et inhiber le remplissage des grains d'où un grand risque d'échaudage.

Phase formation du grain : Les besoins en eau sont très élevés à ce stade. Un déficit en eau, au stade grain laiteux, ainsi que les brusques élévations de températures entraînent un dessèchement de la feuille étandard qui provoque le ralentissement de la migration des réserves vers le grain et un grand risque d'échaudage.

Cet obstacle peut s'apercevoir, si les températures maximales dépassent 25°C. Durant les stades grain laiteux et grain pâteux, la quantité d'eau contenue dans le grain constitue le palier hydrique qui est une étape critique pour le remplissage du grain. A maturité, un apport en eau ralentit le dessèchement de la graine.

Cette phase constitue l'élaboration du rendement : le poids de 1000 grains. Le grain est constitué de la matière sèche qui provient de l'activité de la dernière feuille et de la tige.

Les besoins en eau du blé dur sont plus importants entre les stades de développement-montaison et remplissage des grains [40].

Tableau 4. *Besoin en eau (mm) du blé.*

| Période végétatif | Besoin en eau (mm) |
|--------------------|--------------------|
| Semis-levée | 10 à 20 |
| Levée-montaison | 40 à 60 |
| Montaison-Epiaison | 60 à 80 |

| | |
|------------------------|-----------|
| Epiaison-grain laiteux | 100 à 120 |
| Grain laiteux-pâteux | 20 à 40 |

Source : *Revue céréaliculture ITGC n° 27.*

II.6. La sécheresse en agriculture

Le manque d'eau ou déficit hydrique représente le stress abiotique le plus sévère auquel la culture du blé dur fait face dans les conditions de productions des zones arides et semi- arides [53]. Ce stress se traduit par une série de modification qui touchent les caractères morphologiques, physiologiques et biochimiques, à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieurs aux quantités disponibles [54]. Ceci se répercute sur le rendement économique de la culture, qui peut baisser de plus de 80% [53].

II.6.1. Notion de stress

Un stress désigne à la fois l'action d'un agent agresseur et les réactions qu'il entraîne dans l'organisme agressé, une force qui tend à inhiber les systèmes normaux. Le stress perturbe les structures normales et la coordination des processus variés au niveau moléculaire, cellulaire, et de l'organisme entier [55].

Le stress chez les plantes est toute pression dominante exercée par un paramètre de l'environnement perturbant le fonctionnement habituel de la plante et tout facteur qui limite la production de la matière sèche au-dessous de son potentiel génétique [56].

II.6.1.1. Le stress hydrique

Durant ces dernières décennies, le régime des pluies en Algérie a accusé une régression importante suivie de fortes chaleurs générant une évapotranspiration élevée avec un stress hydrique nuisible au rendement des cultures, rendant difficile toute amélioration de la production céréalière [57].

Le stress hydrique peut se définir comme le rapport entre la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la plante et la quantité d'eau disponible dans son environnement, sachant que la réserve d'eau utile pour la plante est la quantité d'eau du sol accessible par son système racinaire.

II.6.1.1.1. Effet du stress hydrique sur le développement des plantes

Selon [58], l'eau a une grande importance dans la croissance de la plante. Un stress hydrique limite sérieusement la croissance de la plante et sa reproduction par rapport au potentiel du génotype. L'un des premiers effets provoqués par le déficit hydrique est une réduction de la croissance végétative. La croissance de la partie aérienne, et surtout celle des feuilles, est généralement plus sensible que celle des racines. Le stress hydrique fait réduire le nombre de feuilles par plante, la surface foliaire et la longévité des feuilles. Toutefois, si le stress est sévère on peut observer aussi un arrêt total du développement foliaire [59].

Le stress hydrique a deux conséquences quasi simultanées sur le tallage du blé. La première est l'arrêt du processus de tallage qui se traduit par un arrêt de la croissance des bourgeons axillaires. Une carence hydrique précoce durant la phase végétative réduit donc le nombre et la taille des talles chez le blé. La seconde est la réduction de la vitesse de

croissance des talles les plus jeunes [60]. Donc un déficit hydrique contrôle la croissance végétative en réduisant la vigueur de la plante. Les plantes soumises à un déficit hydrique voient généralement leur sénescence s'accélérer ; et une perte trop importante d'eau par transpiration peut conduire à la mort des cellules [61].

II.6.1.1.2. Influence du stress hydrique sur le rendement du blé

Pour le blé dur, la diminution du rendement est d'environ 2q/ha, chaque fois que le stress hydrique s'élève de 10mm [62]. L'organe qui est touché en premier lieu est le limbe de la feuille. Il cesse sa croissance, s'enroule et après le stade anthèse, accélère sa sénescence en cas de stress prolongé. Il se produit alors une réduction de la taille et de la surface des feuilles.

Le stress hydrique diminue l'indice foliaire et la durée de vie de la feuille ainsi que la capacité photosynthétique [63]. Il peut également diminuer la pression de turgescence de la plante et provoquer une perte d'eau du contenu cellulaire. Cette perte de l'état de turgescence peut engendrer à son tour des effets physiologiques très importants. Le degré de sensibilité au déficit hydrique varie avec le stade de développement du blé (périodes végétative, reproductrice et maturation).

Le stress hydrique agit négativement sur le rendement de culture et la qualité des produits [64]. Il se manifeste par la production très réduite du nombre de grains par épi, du nombre d'épis par plante [65], et du nombre d'épis par unité de surface réduisant par conséquent le rendement économique de la culture, qui peut baisser de plus de 80%. Chez les céréales, le stress hydrique affecte la composition de la graine. Les concentrations relatives des différents composés sont modifiées : une augmentation des teneurs en protéines et une baisse des teneurs en amidon et en huile des graines [66].

II.7. Le rendement et ses composants

Le rendement du blé est la résultante de plusieurs composantes : Densité de plantes, capacité de tallage, fertilité-épi, poids de mille grains (PMG), Indice de récolte (HI). Si chacune s'élabore à une phase distincte du cycle, elles interagissent sous l'influence de facteurs pédoclimatiques et agronomiques.

4. grandes composantes du rendement

1. Impact de la densité d'épis sur le rendement du blé

Le nombre d'épis du blé par mètre carré dépend de la densité initiale et de la capacité de tallage.

Il varie entre 400 et 600 épis/m² selon les variétés (± 150 épis/m² selon l'année).

Facteur favorable : montaison longue.

Facteurs défavorables : températures inférieures à -4°C (sous abri) à partir du stade épi 1 cm. Tout stress perturbe la montée des épis et provoque des régressions de talles.

2. Impact de la fertilité-épi sur le rendement du blé :

Ce terme désigne le nombre d'épillets par épi et le nombre de grains par épillet. Il varie entre 35 et 55 grains/épi selon les variétés (± 5 grains/épi selon l'année)

Facteurs défavorables : les phases de méiose et de floraison sont sensibles à des accidents ponctuels (températures extrêmes, rayonnement).

Le nombre d'épis par m², qui s'apparente à la capacité de tallage.

3. Impact du poids des mille grains (PMG) sur le rendement du blé

Ce paramètre est directement corrélé à la taille du grain. Il varie entre 35 et 55 g selon les variétés (± 5 g selon l'année)

Facteurs défavorables : échaudage de fin de cycle et manque d'eau pendant la phase de remplissage du grain (surtout avant « grain laiteux »).

4. Indice de récolte (HI)

C'est le rapport du rendement en matière sèche grains (RMSG) sur le rendement en biomasse aérienne totale. Il est obtenu par la formule suivante :

$$HI\% = \frac{\text{RMSG}}{\text{MST de la Plante à la Maturité \%}}$$

Le rendement du blé se met en place tout au long du cycle du blé au travers de plusieurs composantes. Ces composantes entrent en concurrence entre elles, mais l'intensité de cette concurrence va dépendre des conditions de croissance (rayonnement, eau, azote) ainsi que de la variété utilisée.

II.8. Le LAI ou Indice foliaire

L'indice de surface foliaire est un paramètre important dans un certain nombre de modèles liés au fonctionnement des écosystèmes, aux bilans de carbone, au climat, à l'hydrologie et à la simulation de la croissance des cultures. La cartographie et le suivi des variations spatiales et temporelles de l'indice foliaire sont nécessaires pour comprendre la croissance et le développement des cultures au niveau régional [67].

L'indice de surface foliaire a été calculé à 90 JAS (jours après le semis) selon la procédure indiquée par [68].

$$LAI = \frac{\text{Surface Foliaire d'une Talle}(\text{cm}^2) \times \text{Nombre de Tiges dans un m}^2}{10000}$$

II.8.1. Rôle fonctionnel du LAI

Le rôle fonctionnel du LAI est important pour déterminer la productivité et l'écologie de la végétation. Le LAI joue un rôle crucial dans la régulation des échanges d'énergie, d'eau et de dioxyde de carbone entre la végétation et l'atmosphère. Il affecte également l'interception de la lumière et l'absorption du rayonnement solaire, qui sont essentielles à la photosynthèse et, en fin de compte, à la croissance et au rendement des plantes.

Les valeurs LAI peuvent fournir des indications sur l'efficacité avec laquelle les plantes utilisent les ressources et aider les chercheurs à comprendre la capacité d'un écosystème à absorber le dioxyde de carbone atmosphérique.

CHAPITRE III : MATÉRIELLES ET MÉTHODES

Introduction

L'agriculteur cherche depuis toujours à augmenter la production. Cette dernière est généralement tributaire d'un certain nombre de facteurs dont l'eau peut être citée en première place. La régulation et l'augmentation des rendements sont donc directement liées à la bonne maîtrise du cycle de l'eau et du matériel végétal. L'irrigation des céréales consistera à garantir une production seuil qui sera une production minimale garantie, quelles que soient les conditions climatiques (FILLALI, 1991). S'affranchir du facteur limitant « eau » pour garantir une production seuil revient, par conséquent, à maintenir dans le sol une réserve hydrique suffisante à déterminer compte tenu des conditions climatiques locales d'une part et du stade phénologiques de la culture, d'autre part.

Elle permettrait de même de garantir la réserve hydrique nécessaire du sol compte tenu de la variabilité interannuelle de la pluviométrie, autant en quantité, qu'en répartition dans le temps et ce dans pratiquement toutes les zones aride et semi-aride du pays comme la région de Sidi Bel Abbes. Une fois l'hypothèque du facteur « eau » levée, la fonction de production sera tributaire des autres facteurs de production : préparation du sol, densité et date de semis, désherbage, protection de la culture, etc. Les solutions dégagées pour répondre à ces défis sont multiples. Dans cette étude l'on essaiera de se concentrer sur une des techniques qui nous paraît indispensable et nécessaire pour mieux gérer l'eau dans les zones arides et semi-arides : C'est l'irrigation complémentaire.

PARTIE 1 : MATÉRIELLES

III.I. Présentation générale de la zone d'étude

III.I.1. Situation géographique

La wilaya occupe une position centrale stratégique et s'étend sur environ 15% du territoire de la région Nord-Ouest du pays soit 9 150,63 km². Elle située au Nord-Ouest du pays, la wilaya de Sidi Bel Abbes est délimitée comme suit :

- Nord par la wilaya d'Oran.
- Nord-Ouest par la wilaya d'Ain Témouchent.
- Nord-Est par la wilaya de Mascara.
- Ouest par la wilaya de Tlemcen.
- Est par les wilayas de Mascara et Saida.
- Sud par les wilayas de Nâama et El-Bayad.
- Sud-Est par la wilaya de Saida.

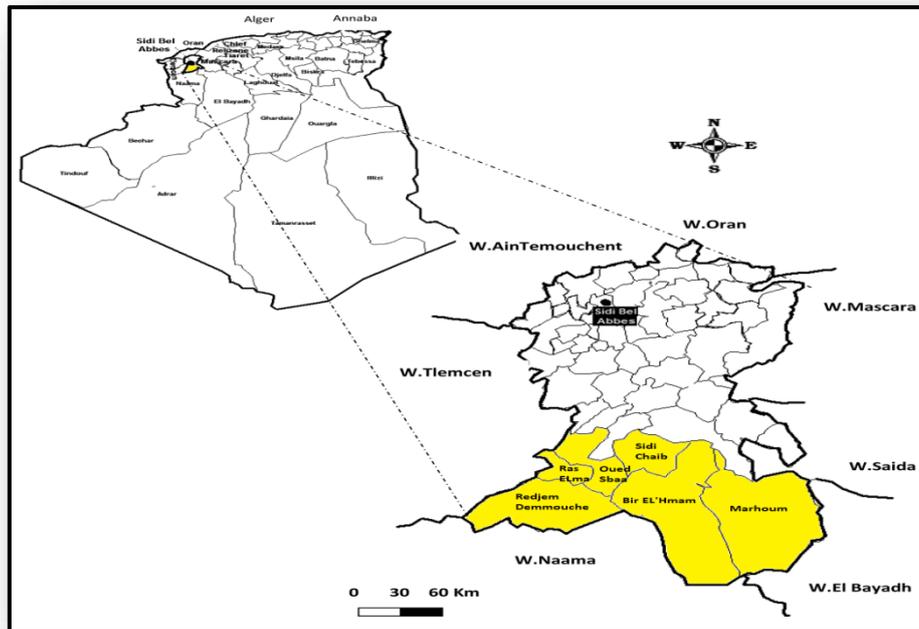


Figure 7. Carte de localisation de la région des hautes plaines de Sidi-Bel-Abbès.

(Source : Open Edition Journal)

III.1.1.2. Le relief

La superficie totale des terres utilisées par l'agriculture est évaluée à 363 191 Hectares [69]. Le relief peut être décomposé en trois grands ensembles naturels physiques distincts :

a) Les zones de montagnes

Elles couvrent une superficie totale de l'ordre de 2 250,37 km² soit 24,59% de la wilaya. Elles occupent au nord, les monts de Tessala, de Beni Chougrane sur environ 864,20 km² et la partie centrale de la wilaya par les monts de Dhaya environ 1.386,16 km².

b) Les zones de plaine

Elles couvrent une superficie totale de l'ordre de 3 239,44 km² soit 35,40% de l'espace wilaya. Elles sont représentées par la plaine de Sidi Bel Abbas environ 2 102,85 km² dont l'altitude varie entre 400 à 800 m et les hautes plaines de Telagh environ 1 136,59 km² dont l'altitude varie de 400 à 1 000 m.

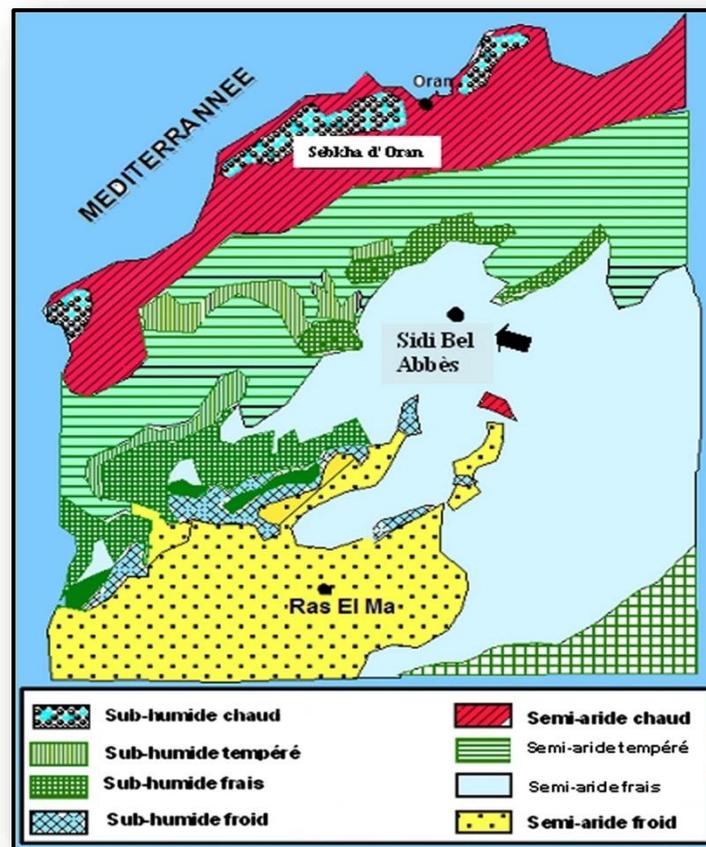


Figure 8. Localisation géographique, étage bioclimatique de la région d'étude.

c) Les zones de steppe

Elles constituent le sud de la wilaya et occupent une superficie totale de l'ordre de 3 660,82 km² soit 40% de l'espace wilaya dont l'altitude varie de 1 000 à 1 400 m.

III.1.1.3. Végétation

Le milieu semi-aride à l'ouest de par ses a tous naturels en plaine sublittoral, plaine intérieure et haute plaine est considéré comme l'un des milieux les plus importants en matière de production végétale en Algérie.

La région Ouest représente environ 42 % en céréales par rapport aux céréales cultivées à l'échelle nationales et contribue de à plus de 30 % à la production nationale [70].

La wilaya de Sidi Bel Abbès, est une région à forte vocation agricole, dont le chef-lieu, Sidi Bel Abbès, est une importante agglomération algérienne.

La Wilaya de Sidi Bel Abbès est une zone agropastorale.

La wilaya de sidi bel abbès, de par son relief et sa SAU de 363 191 ha est une zone agricole diversifiée qui englobe différentes filières stratégiques telles que les céréales, les élevages et l'arboriculture [69].

Ses plaines et au vu des programmes nationaux pour leur redéploiement pour la sécurité alimentaire du pays constitue aujourd'hui un espace très important mais qui reste

vulnérable aux effets du climat semi-aride auquel est soumis la région Ouest du pays et qui selon les dernières données climatologiques ; cette situation tend vers l'aridité [70].

III.1.1.4. Climat de la zone

La wilaya de Sidi Bel Abbès est caractérisée par un climat semi-aride, qui est défini par une saison sèche et chaude et une autre fraîche. Comme tout le nord algérien la wilaya de Sidi Bel Abbès a subi d'importantes modifications : diminution de la pluviosité, dégradation de l'environnement, détérioration de la fertilité des sols etc. Le volume moyen des précipitations annuelles est de l'ordre de 1,6 milliard de mètre cube, souvent mal réparties dans l'espace et dans le temps, imposant une forme d'exploitation généralement tributaire de la pluie. C'est un climat caractérisé par une insuffisante et mauvaise répartition interannuelle et saisonnière des précipitations, se traduisant souvent par un déficit hydrique dans la région [71].

III.1.1.4.1. La pluviométrie

Le rythme pluviométrique présente une irrégularité annuelle et inter annuelle puis s'explique par une tendance à l'aridité actuelle du climat. Étant donné que la ville de Sidi Bel Abbès située entre l'isohyète 350-375, les précipitations moyennes annuelles n'excèdent exceptionnellement les 400 mm/an, c'est le cas de l'année 1996 où elle a atteint 479,9 mm.

D'après l'agence de l'office National de la Météorologie de Sidi Bel Abbès les précipitations étaient faibles entre (1991-2000), mais il y a un retour vers la normale spécialement au cours de l'année 2013 où il y a eu de fortes pluies ayant intervenu dans le nettoyage des barrages et des lits des oueds, et donc la diminution de la pollution [72].

III.1.1.4.2. La température

Les températures au niveau de la ville sont caractérisées par une hausse considérable en été et une importante baisse en hiver, surtout pendant la nuit.

2.1. Activités agricoles

La wilaya se caractérise par une double vocation :

Agricole, au nord, dans la plaine et sur les bas piémonts Sylvopastorale, sur les différents massifs et dans les hautes plaines steppiques de la wilaya [73]. La wilaya compte une superficie agricole totale de l'ordre de 386 369 hectares [69]. La superficie agricole utile des Céréales est de 171500 ha (47%) [74].

La répartition spatiale de la superficie agricole utile est considérablement influencée par la diversité du climat, du relief et celle du sol. Ainsi, la zone montagneuse de Tessala Béni Chougrane et de celle de Dhaya où est pratiquée une agriculture de montagne se trouve être la partie la plus arrosée de toute la wilaya. Mais ne renfermant que peu de terres arables [69]. Les terres effectivement irriguées sont de l'ordre de 8 330 hectares, parmi un total de 363 191 hectares. Les terres improductives s'élèvent à 19 640 hectares de la superficie agricole totale. Les terres de parcours et de 3 723 hectares. La superficie alfatière est dominante en sud de la wilaya en particulier au niveau des daïras de Merine, Ras El Ma et Marhoum [69]. Par contre, la dépression centrale ou zone de plaine, où est pratiquée une

agriculture extensive avec une nette prédominance de la céréaliculture, renferme des sols profonds de bonne valeur agro-biologique et ne reçoivent que peu de pluies dans le temps.

2.2. Séries de données appliquées dans cette étude :

Pour réaliser notre étude, nous avons utilisé des données quotidiennes, réelles, issues d'une station météorologique de l'ONM s'étalant du 2001 à 2008 « série de référence », tel que : RR, Tmin, Tmax. Ainsi que les des sorties de modèle climatique régional de projet CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment;[75]. pour la réalisation d'une descente d'échelle des changements futurs projetés, horizon 2024 -2040, pour les variables climatiques, en comparant avec celles de la période de référence.

Les données utilisées dans la simulation sont issues de la simulation réalisée par le modèle CCCmc-CanRCM sur les scénarios futurs RCP 45 (le seul à avoir été retenu pour les simulations de Downscaling environnementale), ce qui est déjà approuvé dans l'étude de « Simulations des impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la céréaliculture dans la région de Sidi Bel Abbes » par M. kerroum et M.Belkacem (2019), où on a choisi un seul scénario parmi les sorties de LARS-WG (HadGEM2) pour avoir les données météorologiques et pluviométriques.

PARTIE 2 : MÉTHODES ET DISCUSSION

III.II. Présentation du modèle 'SARRA-H'

III.II.1. Généralité sur SARRA-H

III.II.1.1. Description du modèle

SARRA-H est une évolution forte d'un bilan hydrique dynamique simple utilisé pour estimer l'impact d'un scénario climatique sur une culture annuelle.

SARRA-H est plus spécifiquement adapté à l'analyse d'impact du climat sur la croissance des céréales sèches et du rendement potentiel en milieu tropical [76] [77] [78].

Le modèle de culture simule le rendement potentiel sous contraintes hydrique en intégrant les processus de bilan hydrique des sols, d'évaporation et de transpiration potentielle et réelle, de phénologie, d'assimilation potentielle et sous contrainte hydrique, de respiration de maintenance et enfin de répartition des biomasses (feuilles, tiges, racine, grains). Ce modèle de culture a montré de bonnes performances dans le cadre d'analyse d'impact du climat pour des céréales tropicales [79] [80]. Il a été calibré avec une série de variétés locales et modernes (de Mil, de Sorgho et de Maïs) à partir d'essais en milieux contrôlés.

Des suivis agronomiques pluri annuels en milieu paysan ont été mis en place sur plusieurs sites contrastés tant par les pratiques agricoles que par le climat (Niger, Sénégal, Mali, Burkina Fasso) permettant d'évaluer la qualité prédictive du modèle en milieux paysans [81].

III.II.1.2. Le domaine d'application

Le modèle SARRA-H a une diversité de domaines d'applications :

- Analyser les risques climatiques de la parcelle à la région sur le rendement et la biomasse tant pour la variabilité climatique que dans le changement climatique (contexte de sécurité alimentaire).
- Suivre l'état des cultures en cours de saison et prédire les rendements potentiels (contexte de système d'alerte précoce).
- Analyser l'adaptation de stratégies paysannes à son environnement (contexte de résilience) :
- Adaptation des variétés locales vs variétés modernes (photopériodisme, répartition des biomasses).
- Adaptation des stratégies de semis et estimation des risques (semis précoces/tardifs, simulation des dates de semis, mortalité juvénile).
- Stratégie d'autosubsistance ou d'intensification (niveaux de fertilité d'optimum à très faible).
- Optimisation de la ressource en eau (irrigation de complément, observée, protocoles d'irrigations).

III.II.1.3. Les variables d'entrée du modèle SARRA-H

Les utilisateurs du modèle SARRA-H n'emploie en entrée que des variables climatiques :

- La pluviométrie (mm j^{-1}) et la demande climatique journalière (mm j^{-1}) pour le bilan hydrique.
- La température minimale, moyenne et maximale ($^{\circ}\text{C}$) du jour pour le calcul du temps thermique et la gestion de la phénologie.

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

- La durée de l'insolation (heures) ou le rayonnement global (MJ j^{-1}) pour déterminer l'assimilation du carbone.
- La vitesse du vent à 2 m du sol (m s^{-1}).

Les variables agronomiques nécessaires à la simulation sont :

- La date de semis (pour initialiser la simulation).
- La variété.
- La densité de semis (plants ha^{-1}).
- La latitude pour le calcul et la prise en compte de la photopériode.
- La réserve utile (RU) du sol (mm m^{-1}) pour le bilan hydrique.

III.II.1.4. Principes de fonctionnement

L'ensemble des références utilisées dans les paragraphes suivants sont issues de la documentation pour la plateforme ECOTROP de [82] [83] [84].

Le modèle SARRA-H est un couplage simple entre un puits : la demande atmosphérique, et une source : le sol avec sa réserve hydrique. Les opérations sont effectuées au pas de temps journalier et à l'échelle de la parcelle. Pour sa conception, les modèles SARRA-H sont préalablement calibrés en fonction d'observations réalisées sur des parcelles tests. La première étape consiste en le calage de la phénologie permise par l'observation et le relevé des dates de changement de phases simulés en rapport avec la somme des degrés jours observés. Puis, on réalise le calage du bilan hydrique qui résulte en un contrôle graphique des paramètres tels que l'évapotranspiration, l'humidité relative, ou encore des différentes réserves en eau du sol. Les différents indices foliaires et racinaires sont ensuite élaborés pour déterminer l'évolution de la biomasse. Enfin, on réalise le calage du bilan carboné.

SARRA-H s'exécute autour de différents modules regroupant les équations et les étapes de calculs nécessaires à l'aboutissement des simulations. Ils sont catégorisables en quatre entités : les modules d'initialisation, les modules météo, le bilan hydrique et enfin le bilan carboné. Les modules d'initialisation s'exécutent seulement une fois lors du lancement de l'objet et vont calculer notamment les éléments nécessaires à l'initialisation des parcelles permettant de déterminer la réserve hydrique utile initiale : profondeur du sol, capacité des différents réservoirs, contenus initiaux... c'est aussi l'initialisation de la culture et de ses variables phénologiques.

Les modules météos lisent de façon quotidienne les variables d'entrée et en calculent de nouvelles. Ils permettent ainsi de déterminer l'évapotranspiration potentielle (demande climatique) en se basant sur des variables tels que la température, le rayonnement global, l'humidité ou encore le vent. Le modèle de bilan hydrique, géré par l'outil SARRA-BIL se caractérise par : un réservoir sol unique ; la non séparation des phénomènes d'évaporation du sol et de transpiration de la culture ; la présence d'un réservoir de surface fictif pour simuler l'évaporation du sol nu ; la prise en compte du ruissellement par la méthode du seuil ou la méthode LRD [85]. Il recoupe ainsi l'ensemble des calculs concernant les phénomènes hydriques quotidiens en se construisant autour de la question de l'apport en eau : somme de l'irrigation et de la pluie nette, conjuguée à celle de la consommation totale. Enfin, le bilan carboné rassemble les phénomènes de croissance et de développement de la plante.

SARRA-H gère une librairie de formalismes (modules) qui intègrent le principe classique du frein hydrique et le combine avec une croissance potentielle, fonction du rayonnement et de son

interception par le couvert. Il s'agit d'un modèle multiplicatif (ressource hydrique x ressource radiative), complété par un module phréologique pour structurer le cycle de végétation et les processus liés à chaque stade phréologique, par une description simple mais dynamique du couvert, concept de la grande feuille « big leaf » caractérisé par des coefficients morphologiques et géométriques) et par une élaboration physiologique du rendement (compétition source-puits). Les domaines d'extrapolation de ce modèle couvrent donc les situations limitées par l'eau et/ou par le rayonnement et prenant en compte un état global de fertilité des sols constant tout au long du cycle de la plante.

III.II.1.4.1. Création d'un pays et d'une station météorologique ou pluviométrique

Les stations se créent dans le modèle avec un géo référencement plus détaillé qui consiste non seulement à définir le continent, le pays, le code, et le nom de la station, mais aussi à préciser la latitude, la longitude et l'altitude de l'emplacement de celle-ci. Le type de station (station synoptique, pluviométrique, ...) doit également être précisé.

III.II.1.4.2. Importation des données automatique

L'importation automatique est plus pratique, ne s'utilise pas seulement pour les données météorologiques et pluviométriques. Elle permet d'importer plusieurs types de données à la fois (en un seul clic) : données pluviométriques, données météorologiques, des données observées sur la parcelle/sol, la culture, les pratiques culturales et des scénarios de simulations

SARRA-H ne doivent pas comporter d'accents et leur orthographe doit commencer (selon le cas) par :

- Pluviométrie_ (+ nom ou code de la station), pour les données pluviométriques.
- Météorologie_ (+ nom ou code de la station), pour les données météorologiques.
- Dossier_ (+ un identifiant), pour un dossier d'un ensemble de simulations.
- TypeSol_ (+ un identifiant), pour des données caractéristiques du sol.
- ObsParcelle_ (+ un identifiant), pour des données observées sur la culture dans la parcelle.
- Site_ (+ un identifiant), pour des données de définition des stations météorologique et pluviométrique du site.
- Parcelle_ (+ un identifiant), pour le type, épaisseurs de surface et de profondeur du sol défini pour les simulations.
- Modèle_ (+ un identifiant), pour le modèle utilisé pour les simulations
- Itinéraire Technique_ (+ un identifiant), les données d'itinéraires techniques
- Simule_ (+ un identifiant), pour les scénarios de simulations
- Variété_ (+ un identifiant), pour les données caractéristiques de la variété
- Irrigation_ (+ un identifiant), pour les données de l'irrigation créée dans le passé et le futur (jours, mois, années et quantités).

III.II.1.4.3. Le site

L'utilisation de programme SARRA-H nécessite d'abord la création du pays et les stations météorologiques et pluviométriques concernés par les simulations.

III.II.1.4.4. Les Données météorologiques et pluviométriques

En sélectionnant le continent, le pays puis la station, on a créé les fichiers :

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

- « Pluviométrie_DZ20.TXT », pour les données pluviométriques de référence
- « Météorologie_DZ20.TXT », pour les données météorologiques de référence
- « Pluviométrie_DZ21-40.TXT », pour les données pluviométriques de HadGEM2
- « Météorologie_DZ21-40.TXT », pour les données météorologiques de HadGEM2
- Il faut s'assurer que les noms de colonnes des données sont écrits de la même manière qu'initialement prévue dans le modèle. L'ordre des colonnes importe peu dans la version 3.2 de SARRA-H. Mais, l'orthographe, le caractère de la police (majuscule, minuscule) et les espaces après les titres des colonnes du fichier à importer doivent être strictement conformes comme suit :

- CodeStation, Jour et Pluie, pour les données pluviométriques.
- CodeStation, Jour, TMax, TMin, TMoy, HMax, HMin, HMoy, Vt, Ins et Rg, pour :

III.II.1.4.5. Les Paramètres de la culture

On a créé un fichier « Variete_SIM.TXT », composé d'une grille de données organisées sous forme de valeurs paramétriques, définies pour prendre en compte les différents facteurs physiologiques et environnementaux qui régissent la croissance et le développement des variétés de blé dur retenues :

La texture du sol et Parcelle

On a créé deux fichiers :

- « TypeSol_FT.TXT », est composé d'une grille de données représentant les caractéristiques des textures de sols existants.
- « Parcelle_FT.TXT », est composé d'une grille de données représentant les caractéristiques des textures de sol utilisables lors des simulations.

III.II.1.4.6. Irrigation

On a créé d'abord un fichier sous le nom « Irrigation_IHFR » qui contient les différentes données nécessaires pour notre irrigation complémentaire dans le passé tel que les jours, les mois ; les années et la dose.

Puis, de même manière on a ajouté un autre fichier sous le nom « Irrigation_FUTURE » qui porte les données nécessaires pour notre irrigation complémentaire dans Le futur.

III.II.1.4.7. Importation des données

Les données climatiques (pluviométriques et météorologiques) doivent exister, au pas de temps journalier, sur une période continue qui correspond à la période des simulations. Pour les importer, elles doivent être enregistrées sous format texte (.txt), dans le dossier Import de la DBEcosys du modèle SARRA-H.

III.II.1.4.8. La simulation

On a créé un fichier « Simule_IHFR.TXT » définissant un certain nombre de paramètres d'entrée (données climatiques, données caractérisant la culture, du site, de la parcelle et l'irrigation ...). Comme déjà souligné plus haut, les données pluviométriques et météorologiques doivent exister dans le modèle, au pas de temps journalier, sur une période continue correspondant à la période de notre simulation.

Exécution des simulations

Dans l'onglet « Simulation », nous avons exécuté notre simulation en cliquant sur le bouton "Lancer".

Finissant par l'exportation des résultats obtenus qui sont illustrés dans le chapitre suivant.

III.II.1.5. L'irrigation complémentaire

L'irrigation complémentaire peut être définie comme étant l'application d'une quantité limitée d'eau aux cultures quand les précipitations ne fournissent pas suffisamment d'eau pour la croissance des plantes afin d'augmenter et de stabiliser les rendements. C'est une intervention temporaire, selon les disponibilités en eau, pour remplacer l'évapotranspiration [86].

III.II.1.5.1. Complémentaire par rapport à quoi ?

Elle est dite complémentaire, parce qu'elle est conçue pour compléter les eaux de pluies afin de subvenir aux besoins de la culture, compte non tenu de l'irrégularité intra et inter saisonnière des pluies. Plusieurs études ont montré l'intérêt de cette technique d'irrigation pour corriger le déficit hydrique et la possibilité d'améliorer les rendements. Cependant les potentialités et les limites de cette technique ne sont pas trop connues en Algérie et nécessitent encore beaucoup de recherches et des expérimentations « au champ » pour introduire et vulgariser cette technique dans l'agriculture Algérienne.

III.II.1.5.2. Intérêt de l'irrigation de complément

Selon [87], l'intérêt d'une irrigation de complément pour une culture pluviale peut être résumé en les points suivants :

- Augmentation et stabilisation des rendements
- Amélioration de la qualité de la production
- Augmentation de la superficie des terres cultivées
- Conservation de l'eau et réduction du coût de la culture.

III.II.1.5.3. Dose et date d'irrigation

En raison de la faible précipitation sur notre région d'étude et pour accroître la production et sécuriser les agriculteurs, nous avons eu recours à l'irrigation de complément pour gérer de façon économique et rationnelle les irrigations des céréales, pour diminuer au maximum l'effet de stress hydrique sur le rendement, à cet effet on a fait plusieurs apports d'irrigations présentées en dessous :

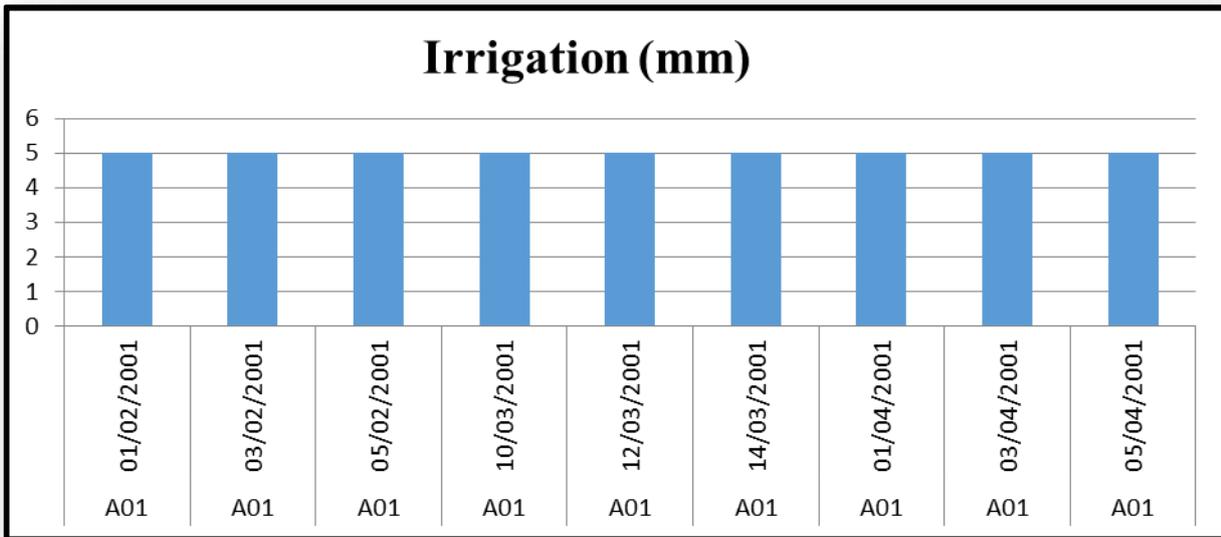


Figure 9. Irrigations créées en 2001.

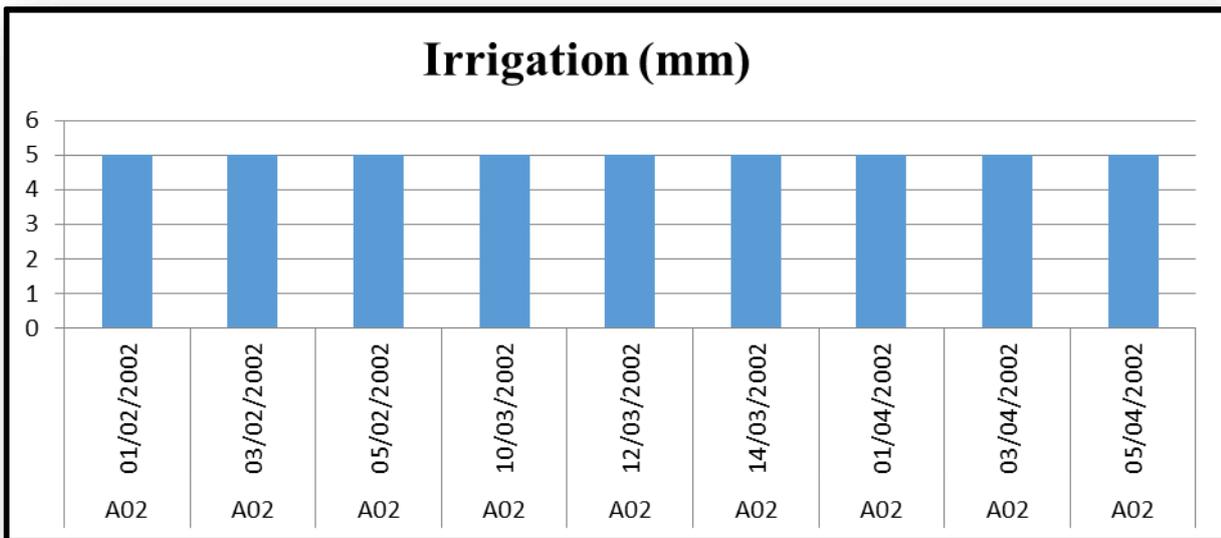


Figure 10. Irrigation créées en 2002.

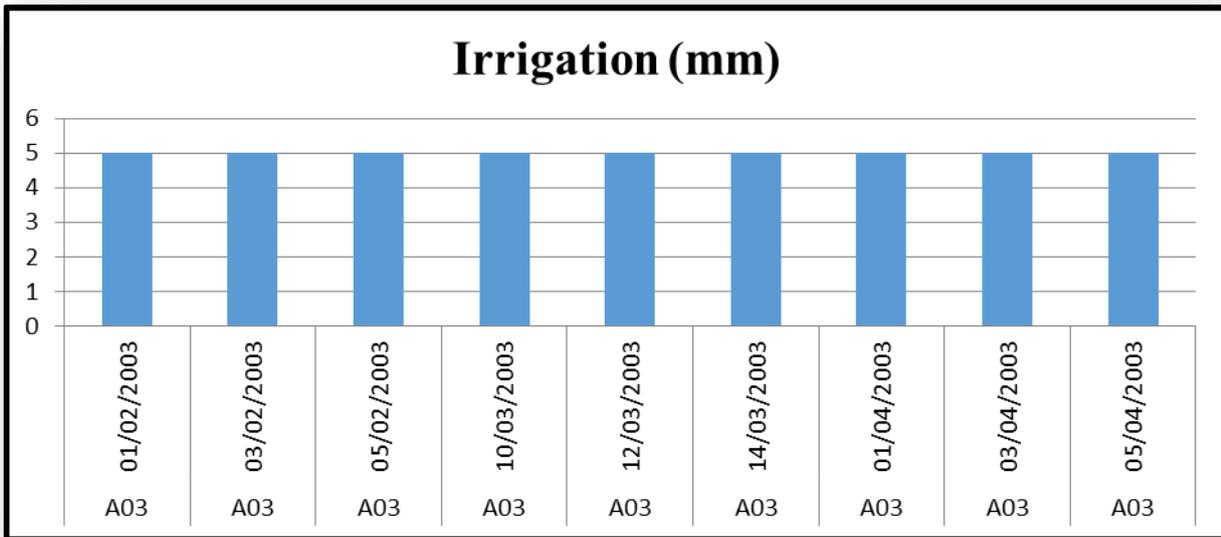


Figure 11. Irrigations créées en 2003.

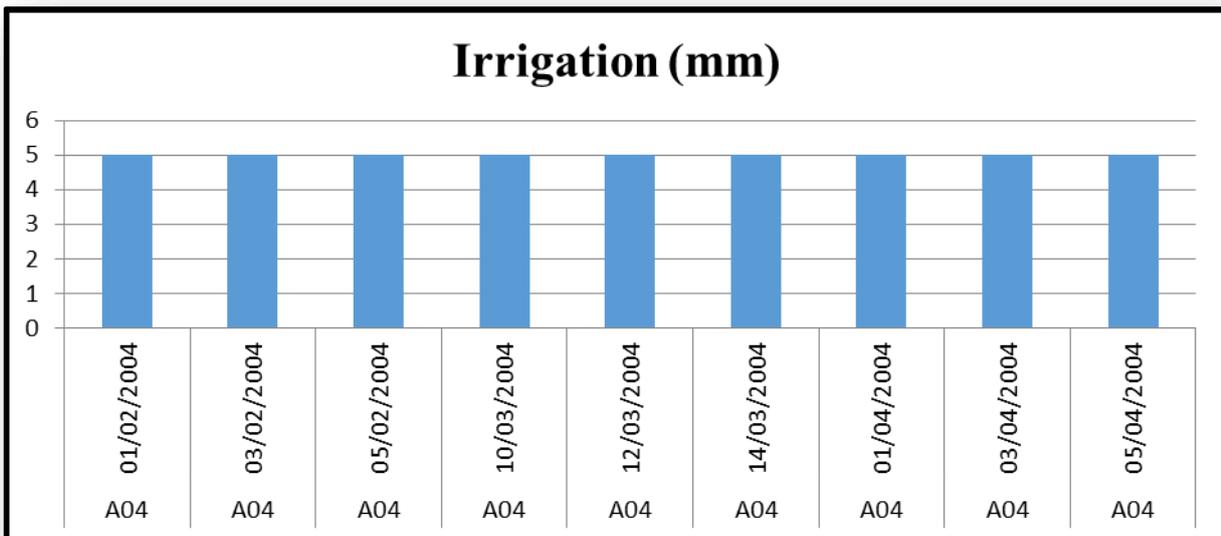


Figure 12. Irrigations créées en 2004.

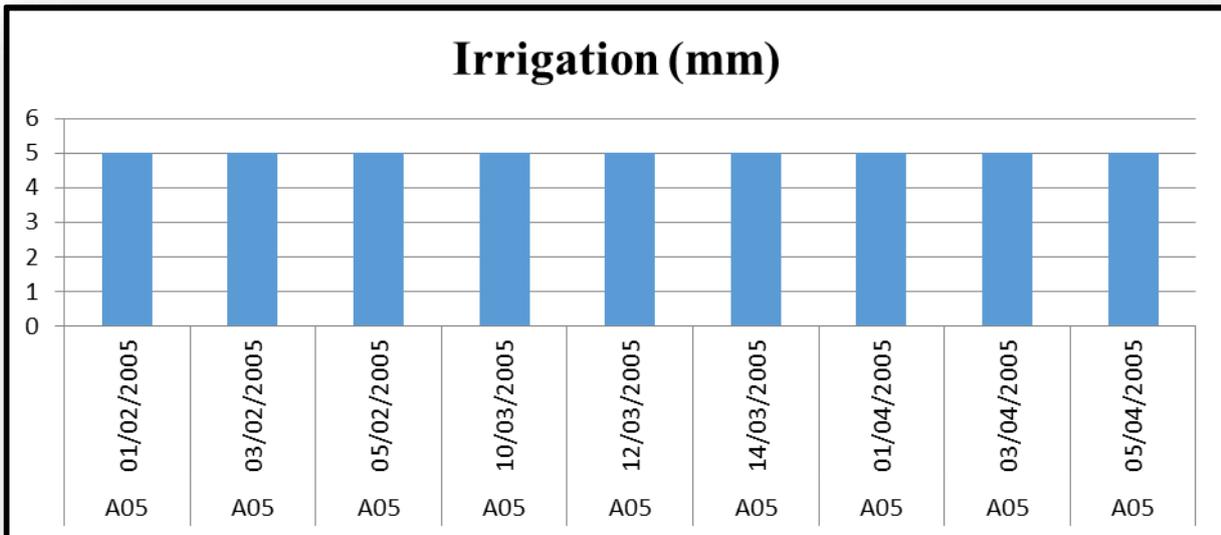


Figure 13. Irrigations créées en 2005.

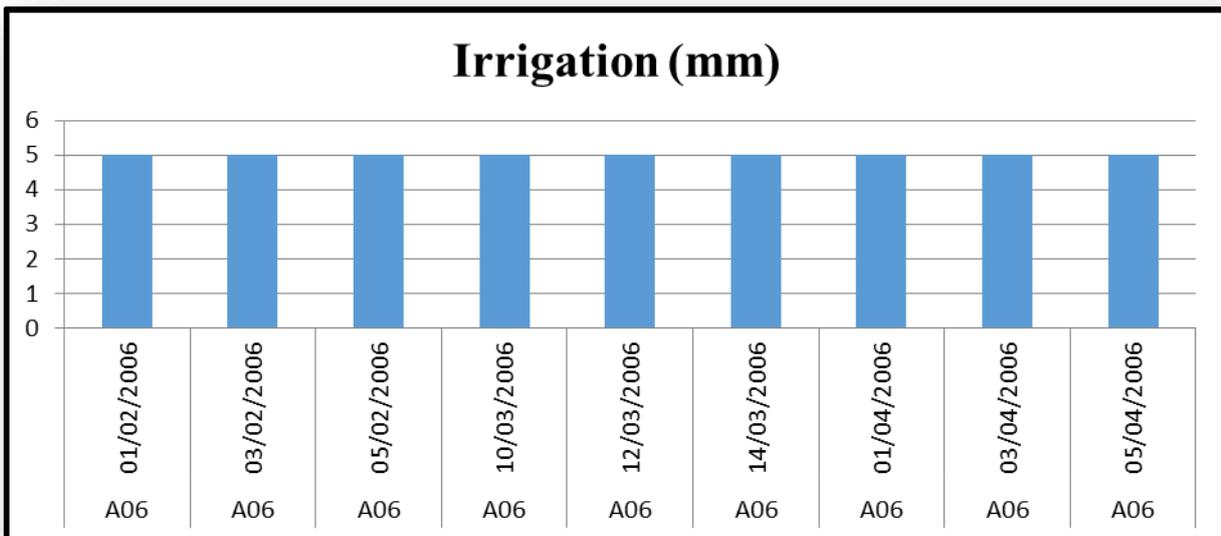


Figure 14. Irrigations créées en 2006.

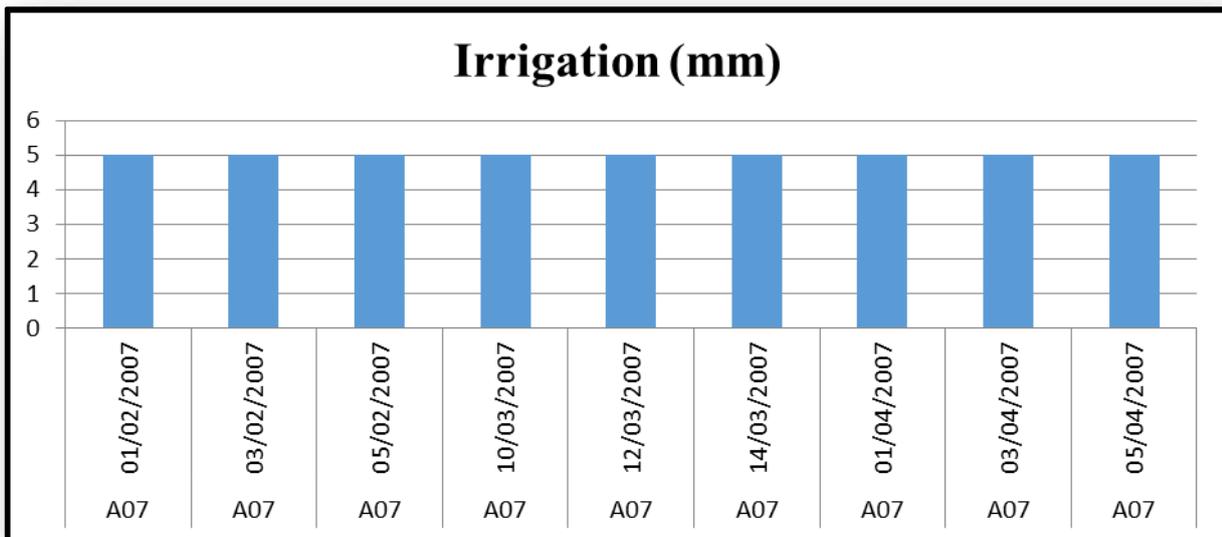


Figure 15. Irrigations créées en 2007.

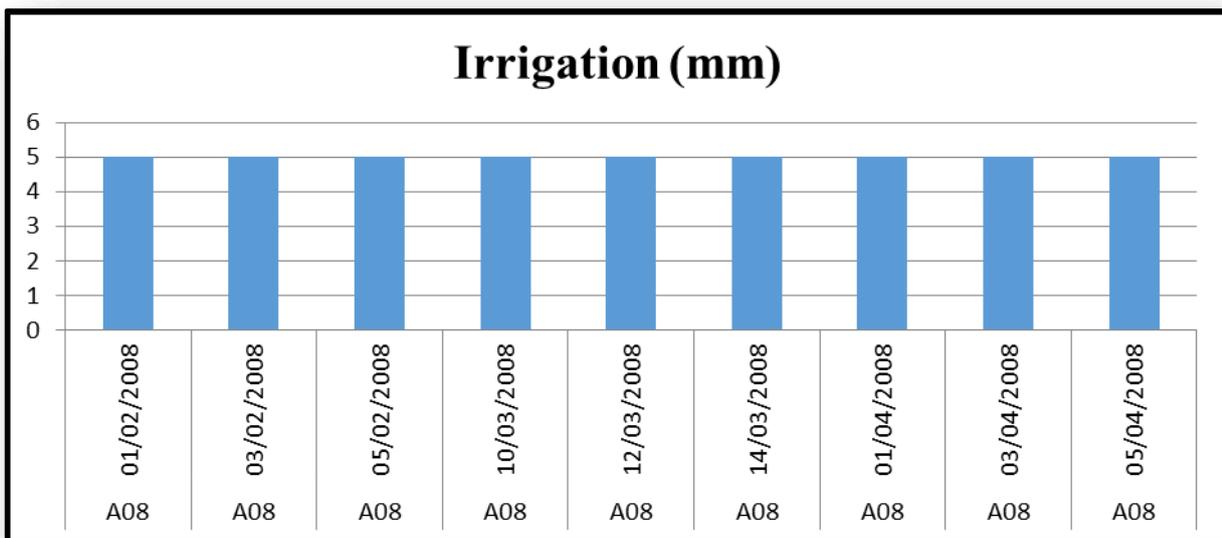


Figure 16. Irrigations créées en 2008.

Les figures (10-17) montrent les irrigations effectuées pour les cinq variétés (Boussalem, Waha, Chens , Vitron ,OuedZenati) à partir de l'année 2001 jusqu'à 2008 en raison de faible précipitation et le besoin en eau de différentes variétés de blé dur étudiées selon leurs stade de développement ,après une analyse basée sur ces deux conditions on a arrivée a fixé les dates et la dose nécessaires pour notre culture illustrées sur les figures en dessus avec une quantité de 15 mm chaque mois distribuée sur 3 jours du mois de Février, Mars et Avril à partir de l'année 2001 jusqu'à 2008 consternant la partie de calibration (passé) .

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

Cette technique est aussi réalisée pour la partie de simulation en futur gardant les mêmes conditions tel que la quantité d'irrigation de 15 mm et les mêmes jours et mois de l'horizon 2024-2040 pour les différentes variétés de cultures montrée dans l'annexe.

III.II.2.1. Résultats des simulations des rendements (2001-2008)

Les figures 18 19 et 20 représentent la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2008 tels que :

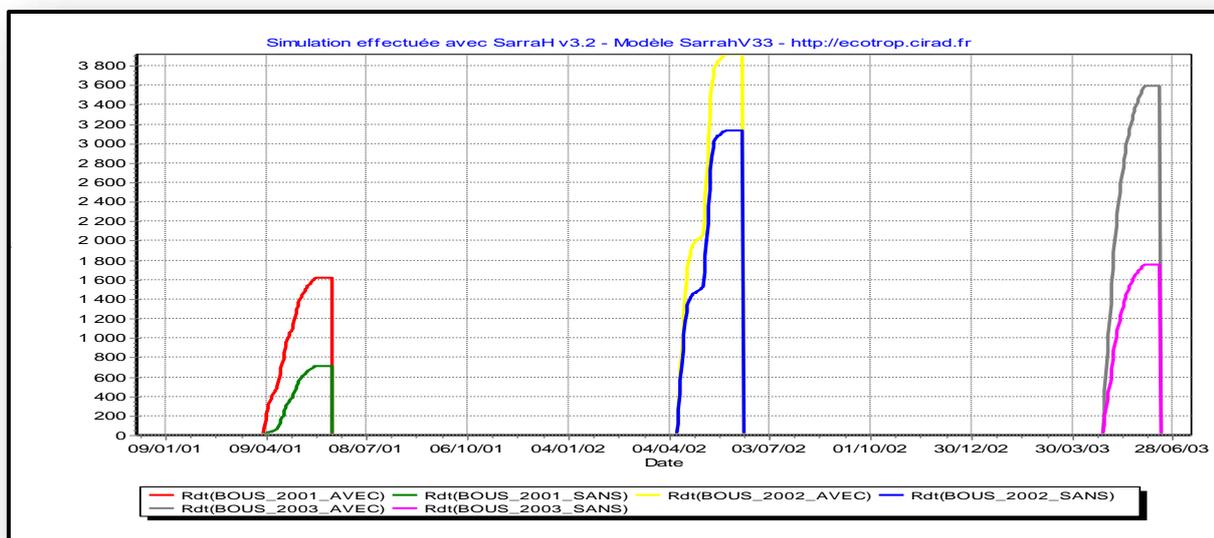


Figure 17. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2001-2003.

La figure 18 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2003. Le rendement en grain sans irrigation varie de 712,48 kg/ha (2001) à 3135,81 kg/ha (2002) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 3916,35 kg/ha en 2002. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2001 jusqu'à 2003.

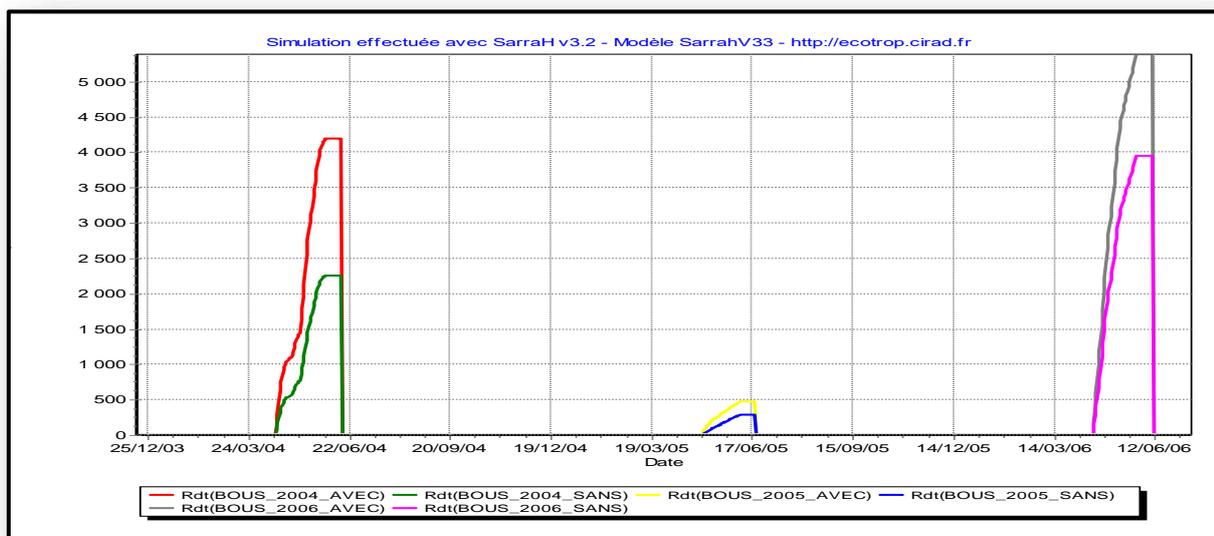


Figure 18. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2004-2006.

La figure 19 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2004 jusqu'à 2006. Le rendement en grain sans irrigation varie de 288,06 kg/ha (2005) à 3954,05 kg/ha (2006) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5383,26 kg/ha en 2006. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2004 jusqu'à 2006.

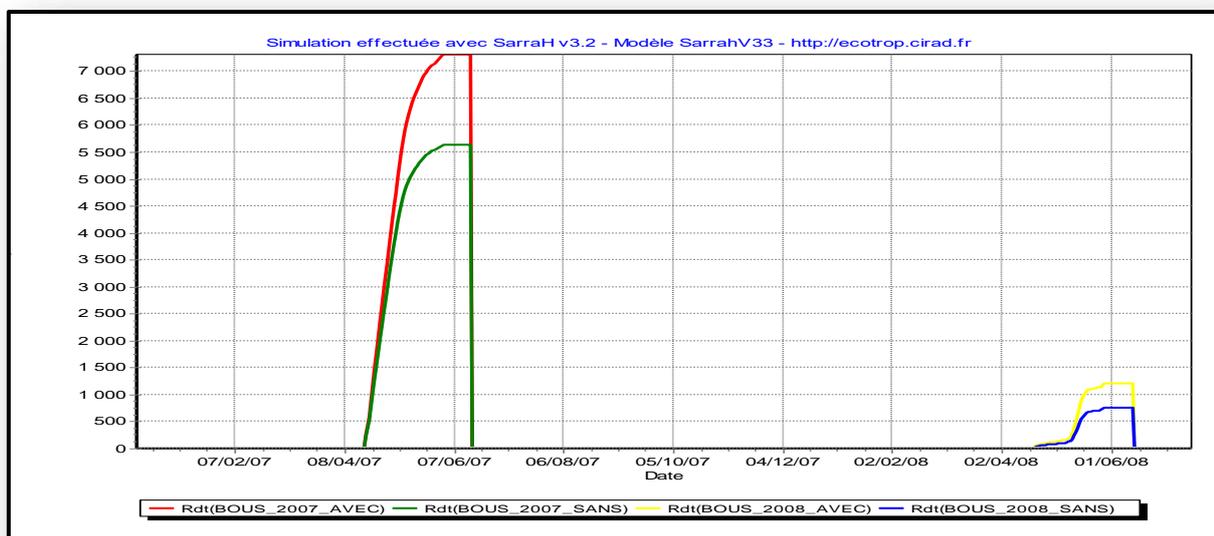


Figure 19. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2007-2008.

La figure 20 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2007 jusqu'à 2008. Le rendement en grain sans irrigation varie de 748,93 kg/ha (2008) à 5635,14 kg/ha (2007) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 7308,43 kg/ha en 2007. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2007 et 2008.

Les figures 21 22 et 23 représentent la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2008 tels que :

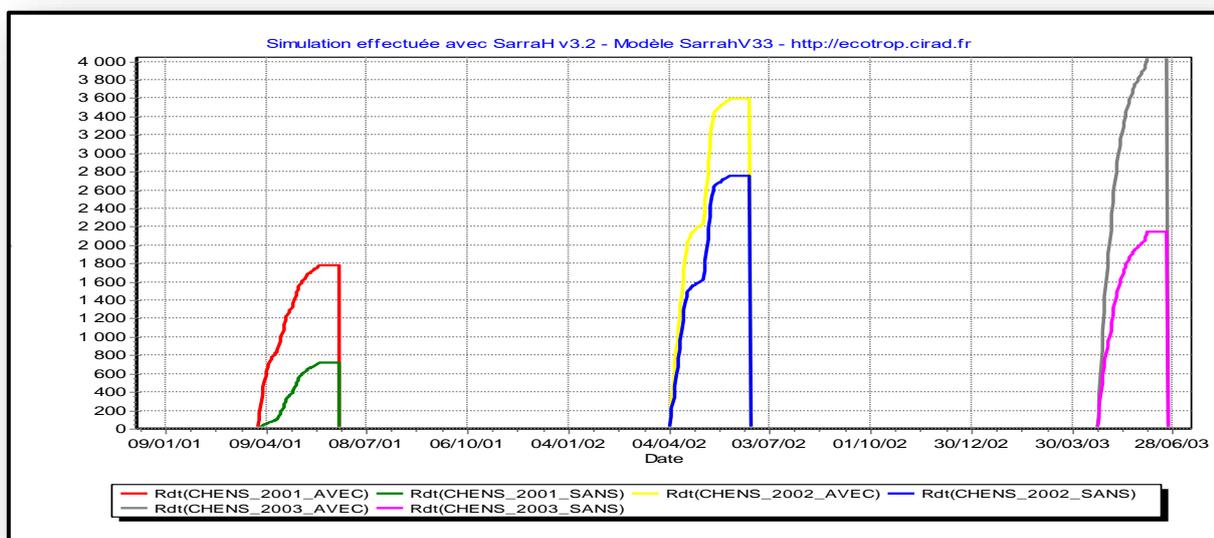


Figure 20. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2001-2003.

La figure 21 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2003. Le rendement en grain sans irrigation varie de 720,21 kg/ha (2001) à 2142,56 kg/ha (2003) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 4043,38 kg/ha en 2003. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2001 jusqu'à 2003.

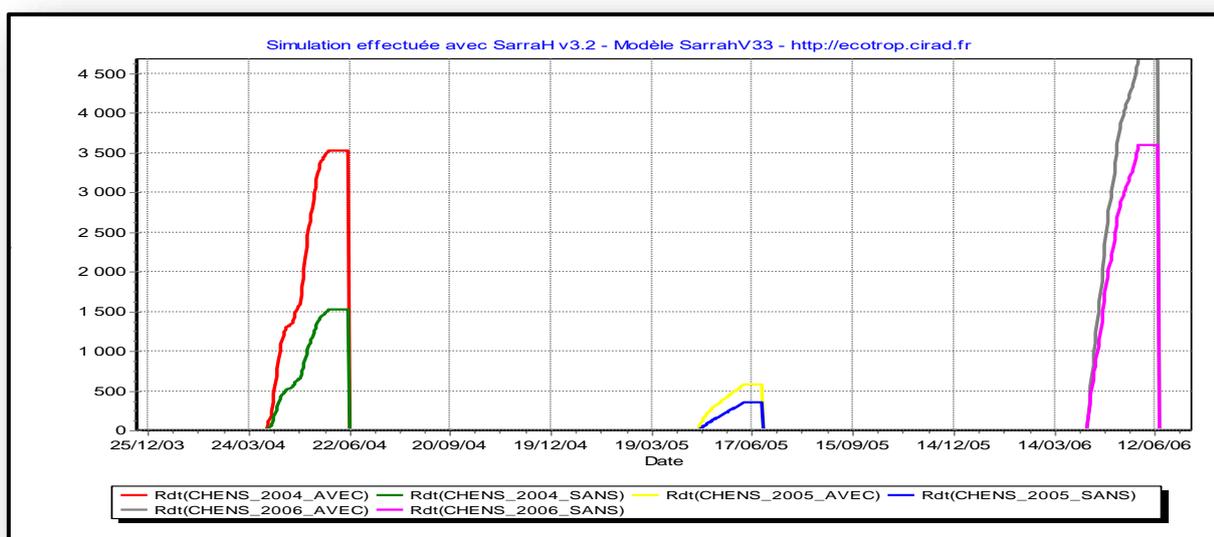


Figure 21. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2004-2006.

La figure 22 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2004 jusqu'à 2006. Le rendement en grain sans irrigation varie de 1527,29 kg/ha (2004) à 3590,46 kg/ha (2006) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 4680,98 kg/ha en 2006. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2004 jusqu'à 2006.

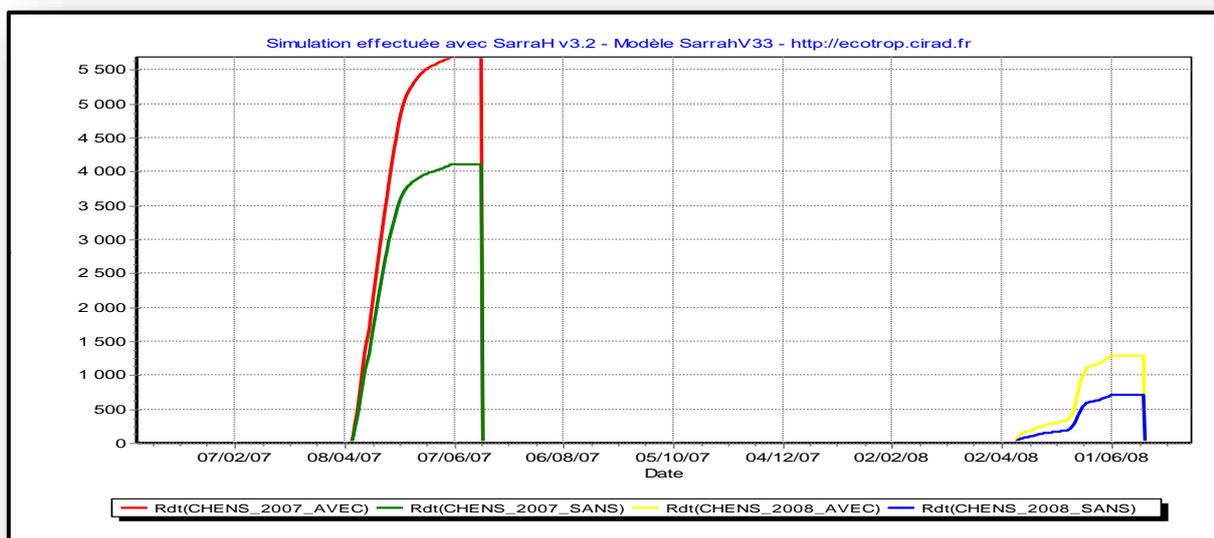


Figure 22. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2007-2008.

La figure 23 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2007 jusqu'à 2008. Le rendement en grain sans irrigation varie de 5635,14 kg/ha (2007) à 748,93 kg/ha (2008) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 7308,43 kg/ha en 2007. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2007 et 2008.

Les figures 24 25 et 26 représentent la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2008 tels que :

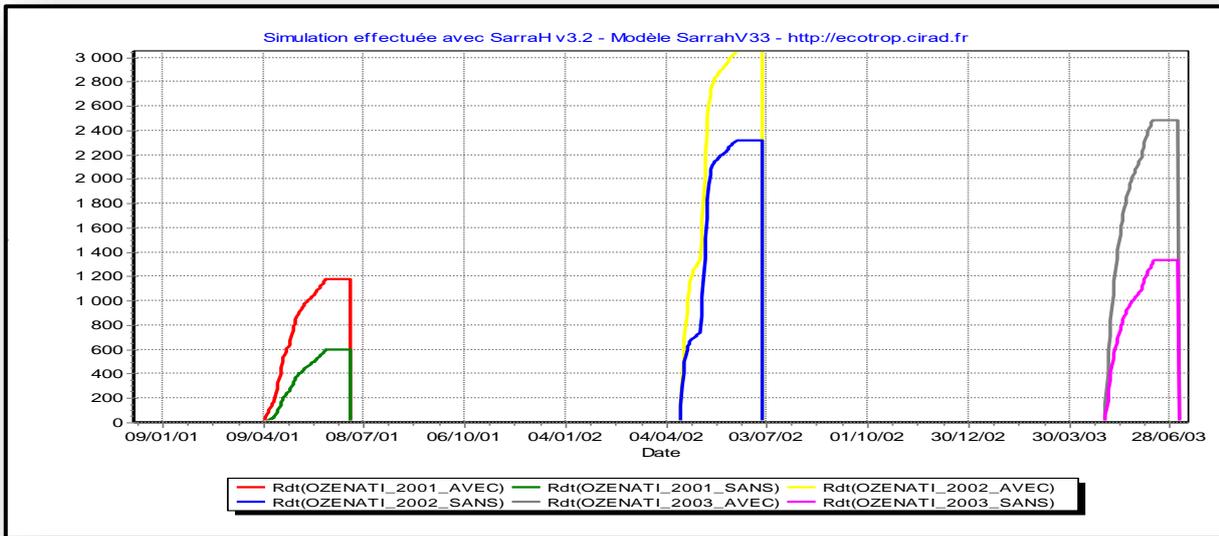


Figure 23. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2001-2003.

La figure 24 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2003. Le rendement en grain sans irrigation varie de 601,41 kg/ha (2001) à 2316,52 kg/ha (2002) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 3050,67 kg/ha en 2002. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2001 jusqu'à 2003.

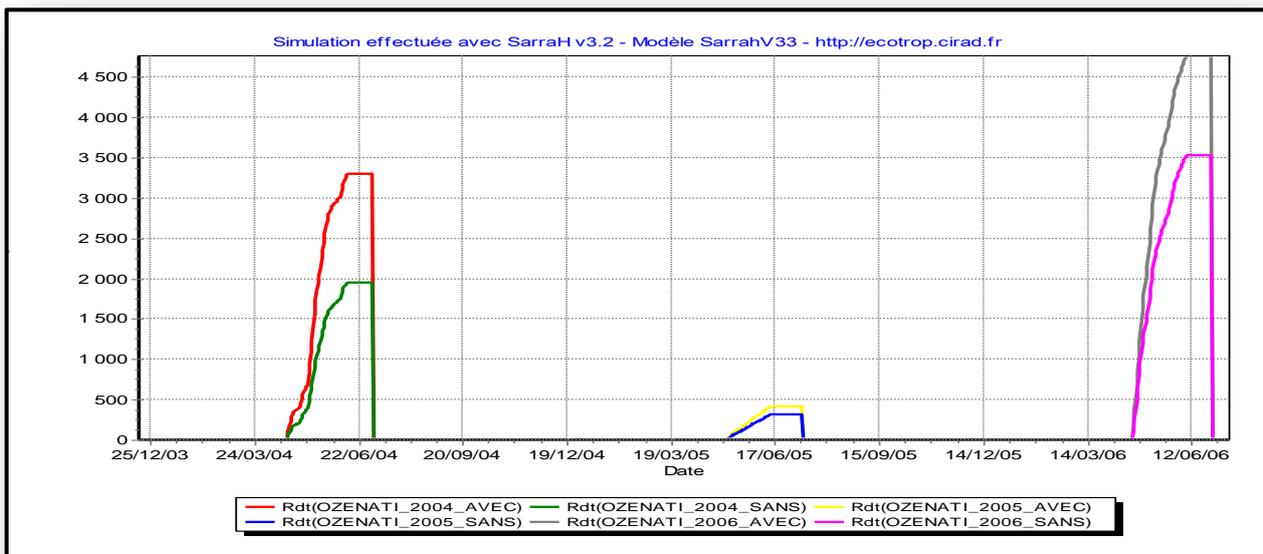


Figure 24. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2004-2006.

La figure 25 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2004 jusqu'à 2006. Le rendement en grain sans irrigation varie de 318,31 kg/ha (2005) à 3530,72 kg/ha (2006) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 4765,19 kg/ha en 2006. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2004 jusqu'à 2006.

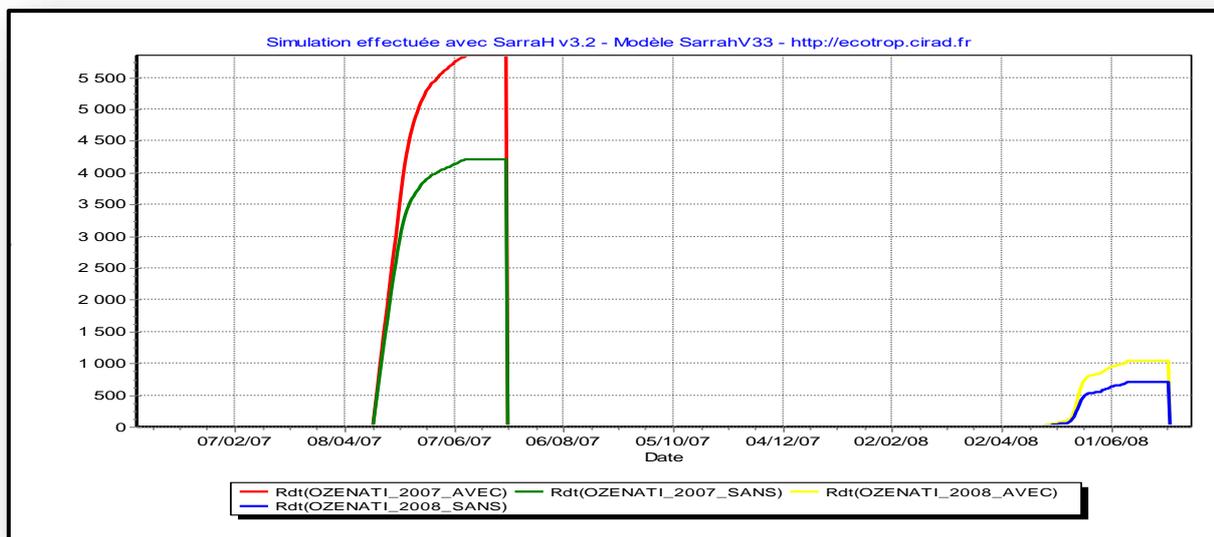


Figure 25. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2007-2008.

La figure 26 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2007 jusqu'à 2008. Le rendement en grain sans irrigation varie de 712,90 kg/ha (2008) à 4217,37 kg/ha (2007) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5846,72 kg/ha en 2007. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2007 et 2008.

Les figures 27 28 et 29 représentent la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2008 tels que :

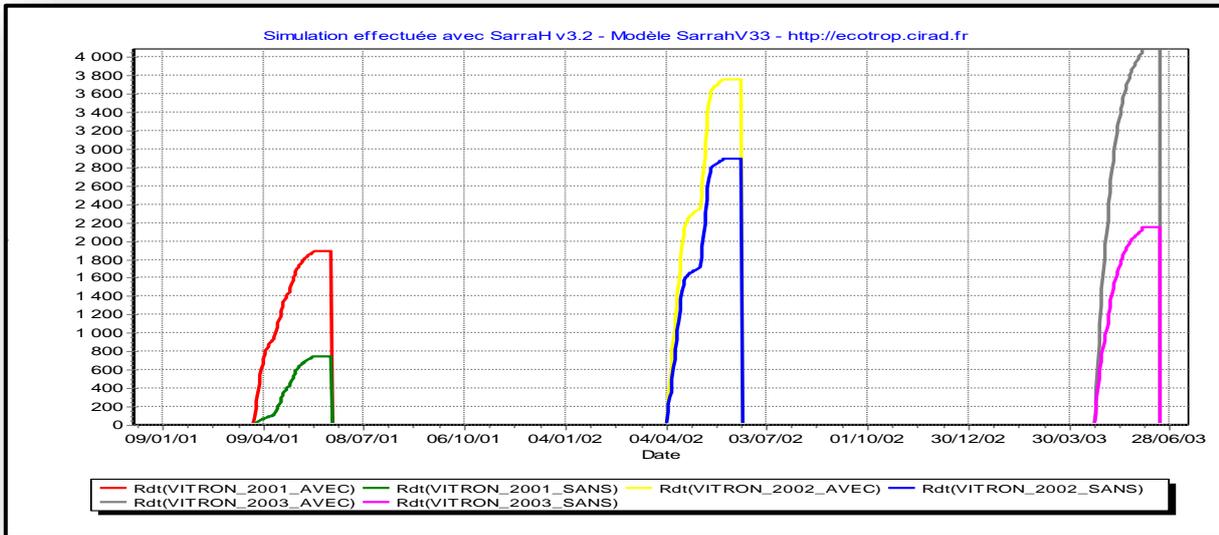


Figure 26. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2001-2003.

La figure 27 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2003. Le rendement en grain sans irrigation varie de 747,58 kg/ha (2001) à 2888,57 kg/ha (2002) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 4085,23 kg/ha en 2003. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2001 jusqu'à 2003.

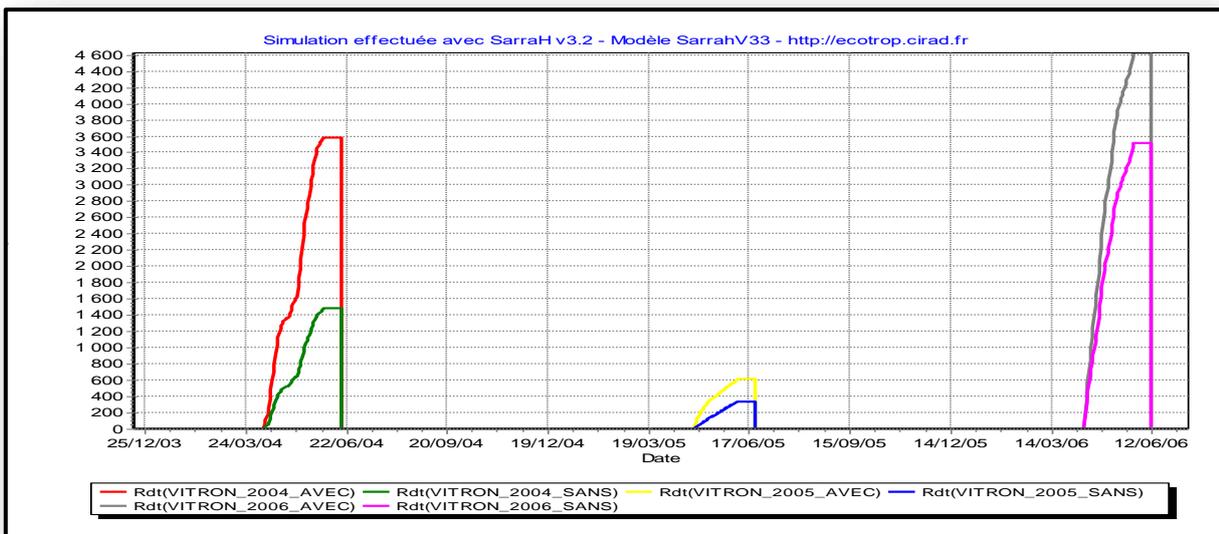


Figure 27. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2004-2006.

La figure 28 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2004 jusqu'à 2006. Le rendement en grain sans irrigation varie de 336,85 kg/ha (2005) à 3514,66 kg/ha (2006) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 4622,37 kg/ha en 2006. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2004 jusqu'à 2006.

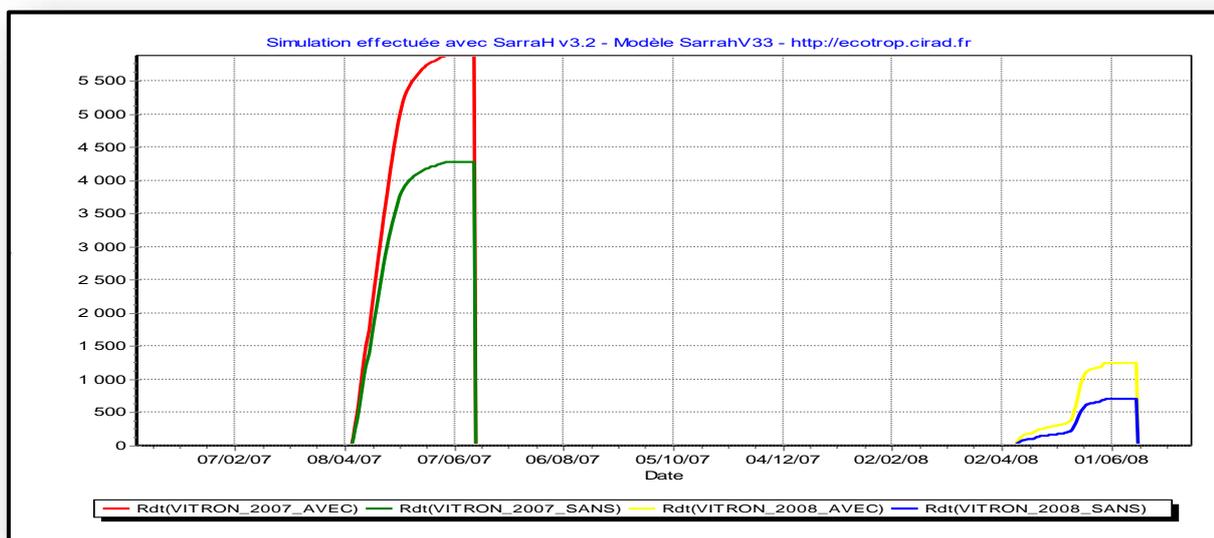


Figure 28. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2007-2008.

La figure 29 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2007 jusqu'à 2008. Le rendement en grain sans irrigation varie de 706,73 kg/ha (2008) à 4275,02 kg/ha (2007) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5880,73 kg/ha en 2007. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2007 et 2008.

Les figures 30 31 et 32 représentent la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2008 tels que :

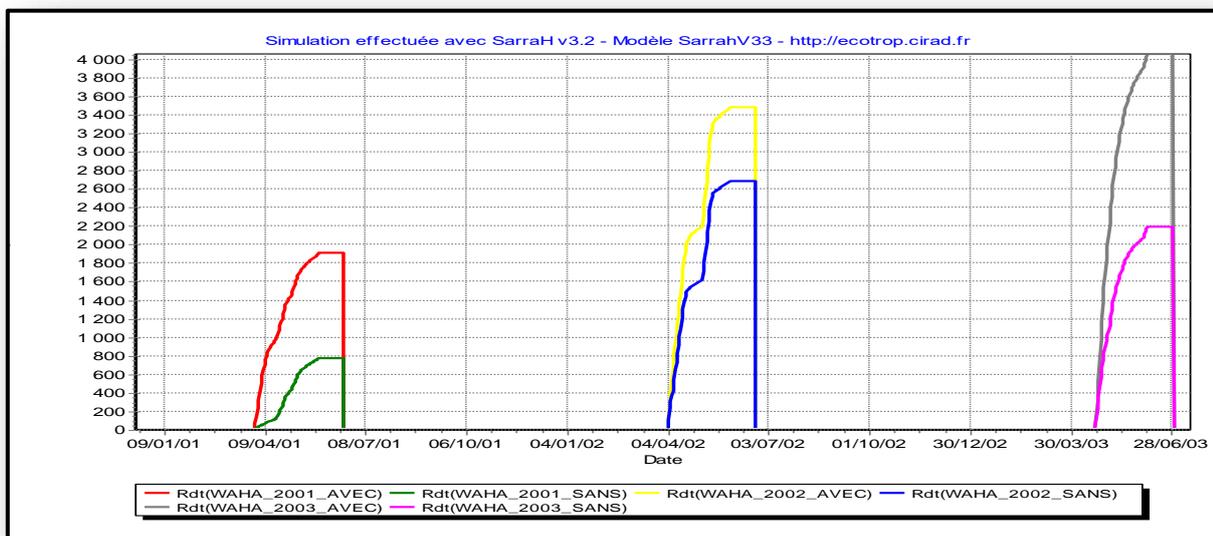


Figure 29. Simulation Waha sans et avec irrigation 2001-2003.

La figure 30 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2001 jusqu'à 2003. Le rendement en grain sans irrigation varie de 779,06 kg/ha (2001) à 2684,72 kg/ha (2002) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 4055,18 kg/ha en 2003. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2001 jusqu'à 2003.

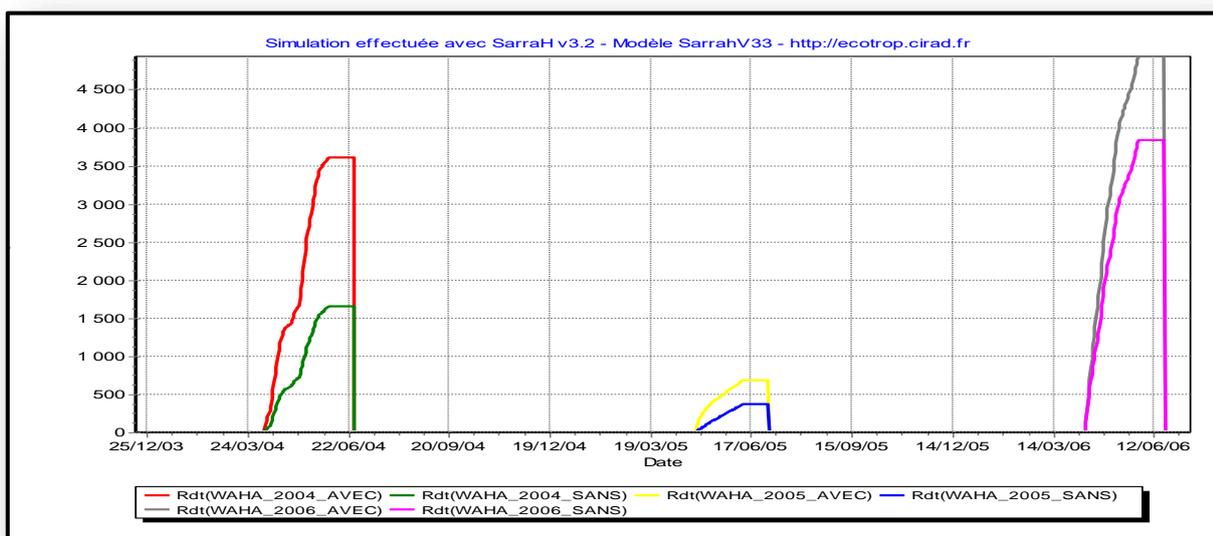


Figure 30. Simulation Waha sans et avec irrigation 2004-2006.

La figure 31 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2004 jusqu'à 2006. Le rendement en grain sans irrigation varie de 370,99 kg/ha (2005) à 3831,48 kg/ha (2006) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 4934,18 kg/ha en 2006. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2004 jusqu'à 2006.

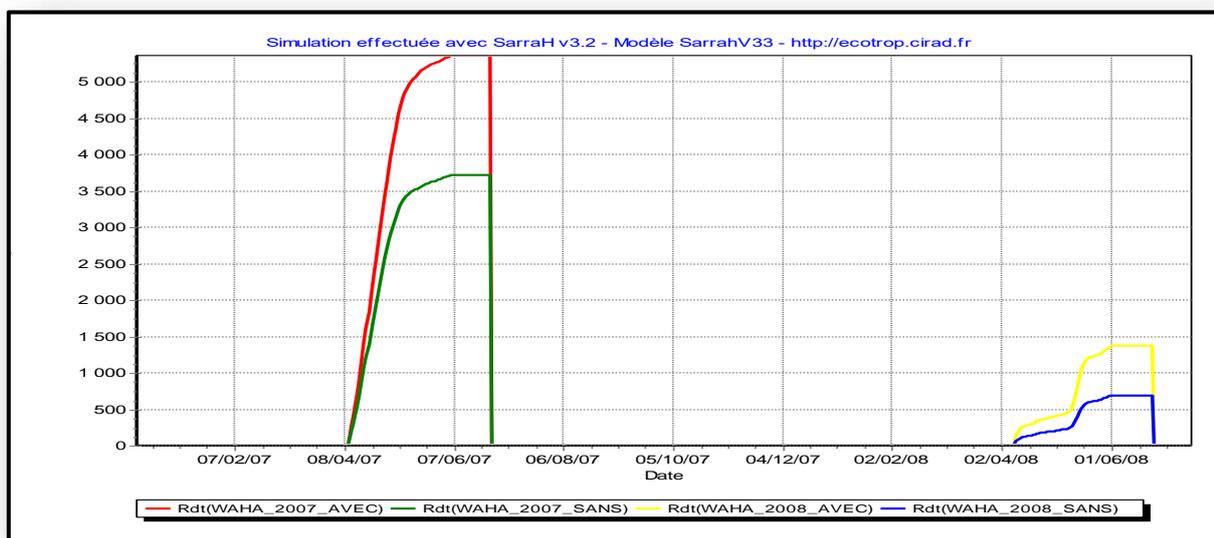


Figure 31. Simulation Waha sans et avec irrigation 2007-2008.

La figure 32 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2007 jusqu'à 2008. Le rendement en grain sans irrigation varie de 692,70 kg/ha (2008) à 3722,08 kg/ha (2007) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5361,20 kg/ha en 2007. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2007 et 2008.

III.II.2.3. Résultats de simulations des rendements pour l'horizon 2024-2040

Les figures (33-39) représentent la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2024 jusqu'à 2040 tels que :

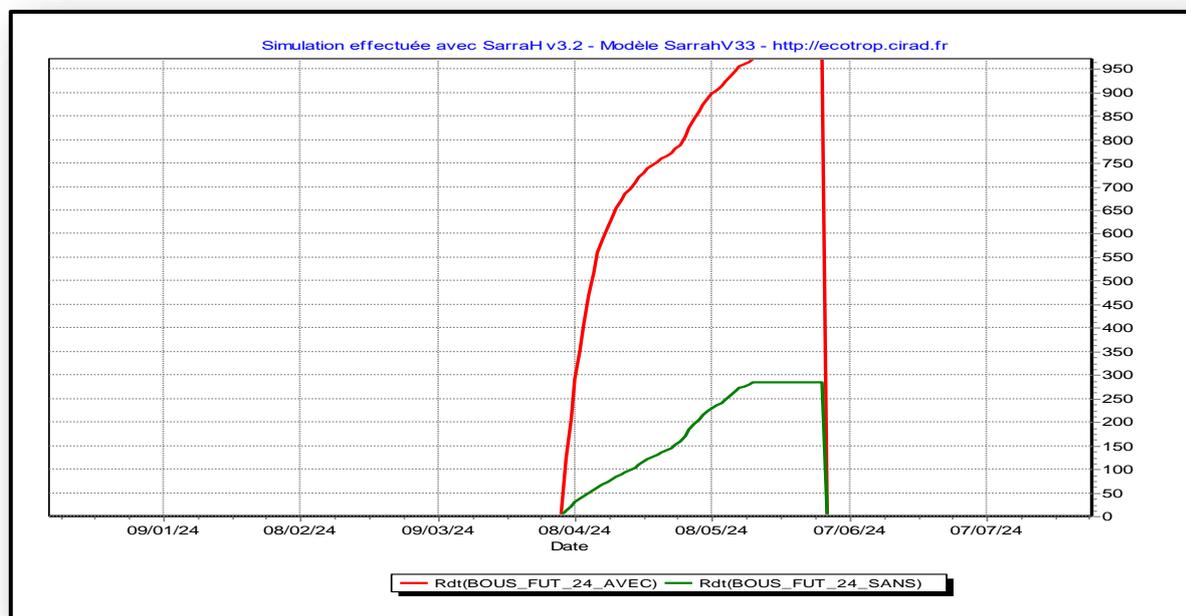


Figure 32. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2024.

La figure 33 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation de l'année 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 284,57 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 971,50 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement.

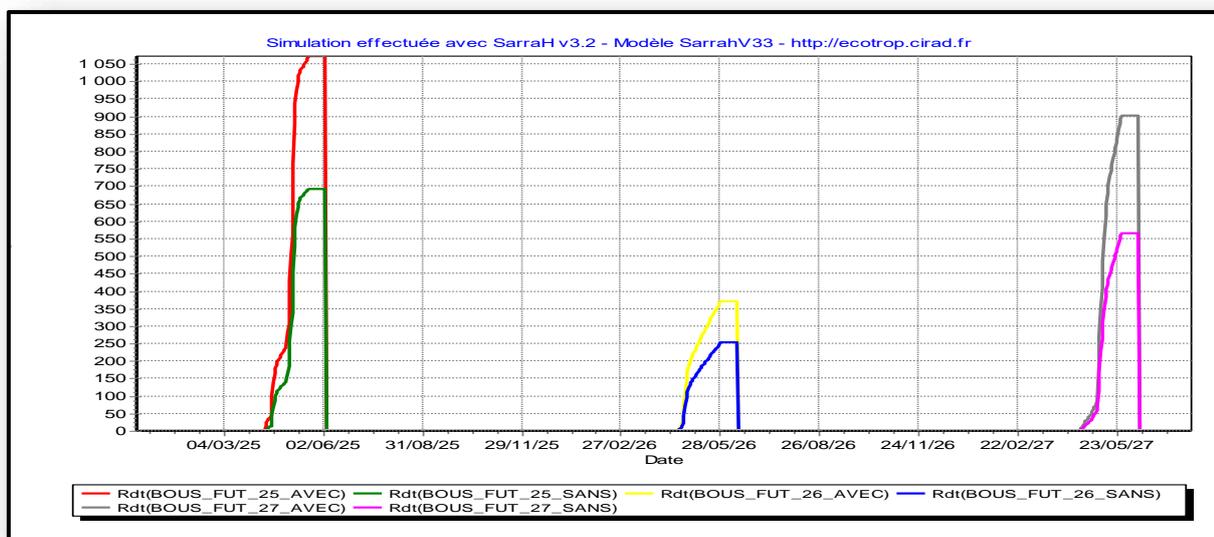


Figure 33. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2025-2027.

La figure 34 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2025 jusqu'à 2027. Le rendement en grain sans irrigation varie de 252,06 kg/ha (2026) à 693,09 kg/ha (2025) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 371,79 /ha en 2025. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2025 jusqu'à 2027.

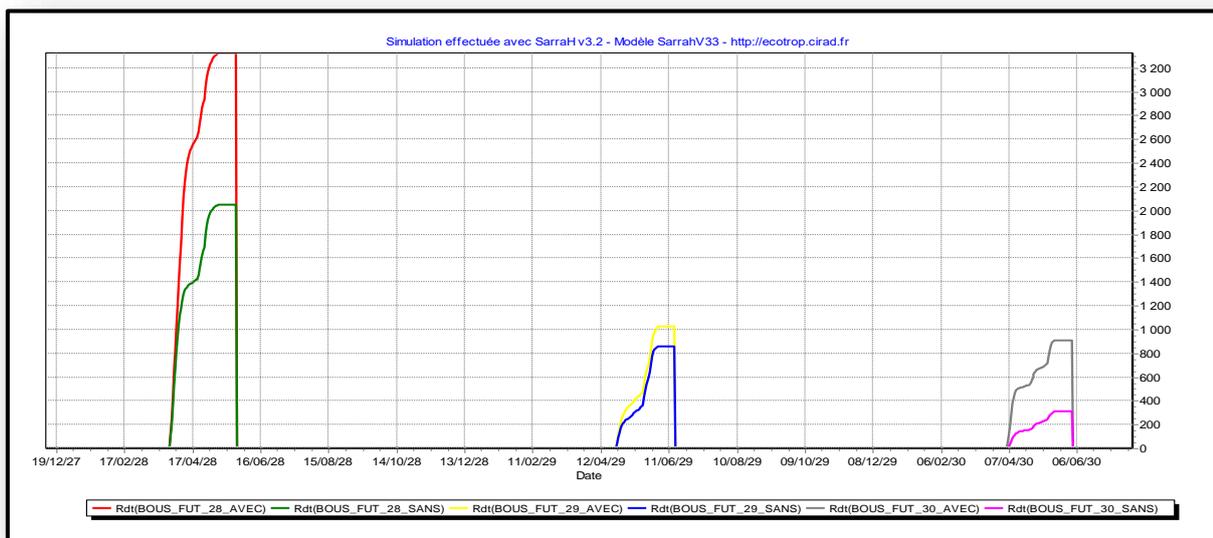


Figure 34. Simulation Boussalem avec et sans irrigation 2028-2030.

La figure 35 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2028 jusqu'à 2030. Le rendement en grain sans irrigation varie de 853,10 kg/ha (2029) à 2049,52 kg/ha (2028) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 3324,34 kg/ha en 2028. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2028 jusqu'à 2030.

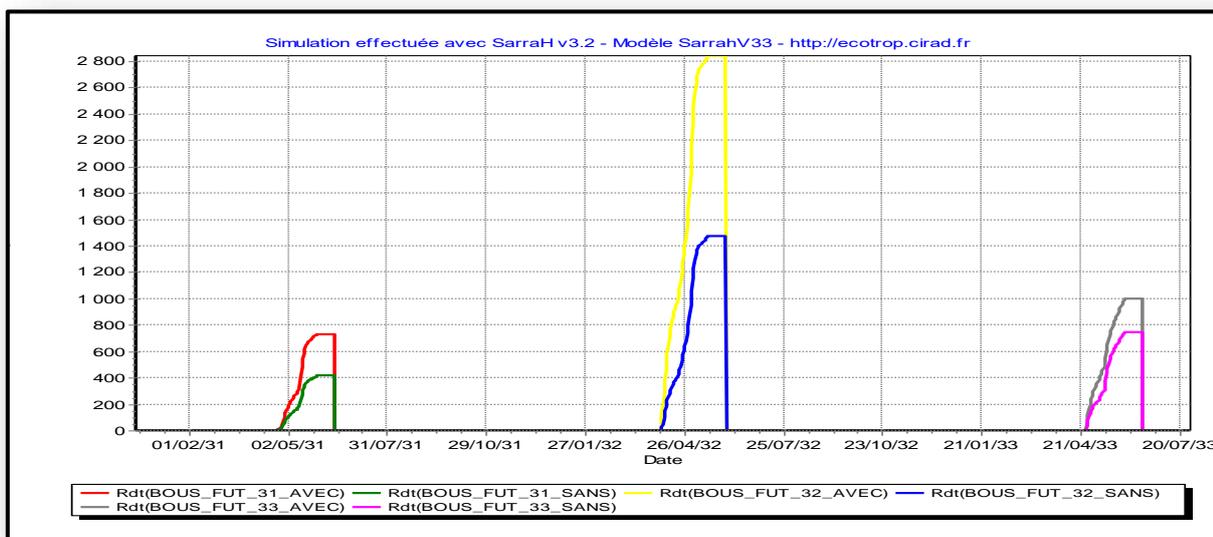


Figure 35. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2031-2033.

La figure 36 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2031 jusqu'à 2033. Le rendement en grain sans irrigation varie de 413,50 kg/ha (2031) à 1474,19 kg/ha (2032) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2840,79 /ha en 2032. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2031 jusqu'à 2033.

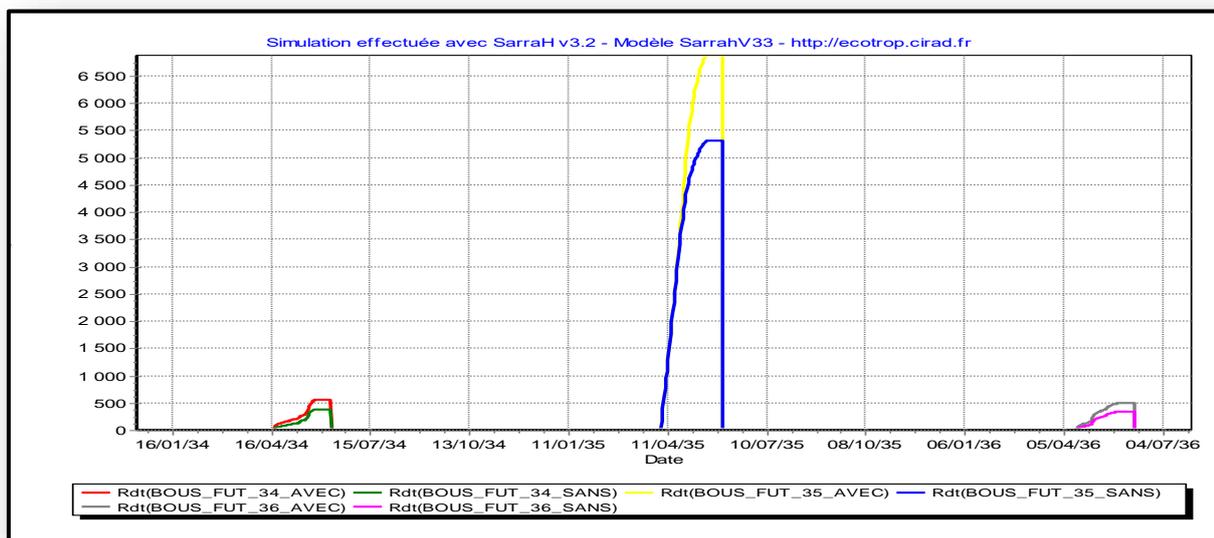


Figure 36. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2034-2036.

La figure 37 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2034 jusqu'à 2036. Le rendement en grain sans irrigation varie de 341,84 kg/ha (2036) à 5303,40 kg/ha (2035) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 6875,37 kg /ha en 2035. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2034 jusqu'à 2036.

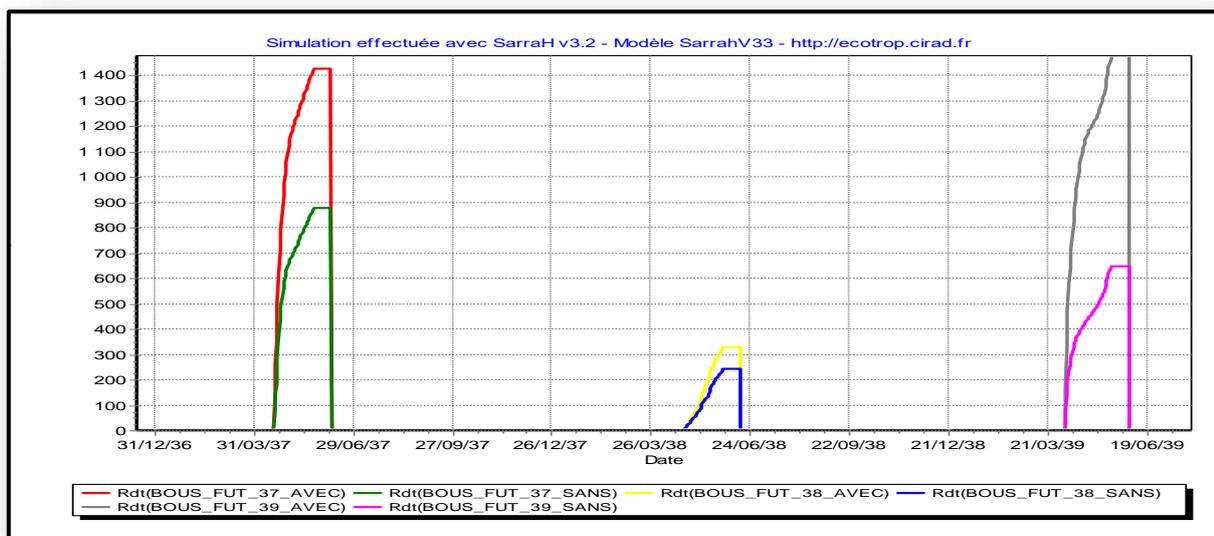


Figure 37. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2037-2039.

La figure 38 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation à partir de 2037 jusqu’à 2039. Le rendement en grain sans irrigation varie de 241,25 kg/ha (2038) à 875,26 kg/ha (2037) où l’irrigation a permis d’atteindre une production maximale de 1477,15 kg/ha en 2039. À l’aide de l’irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2037 jusqu’à 2039.

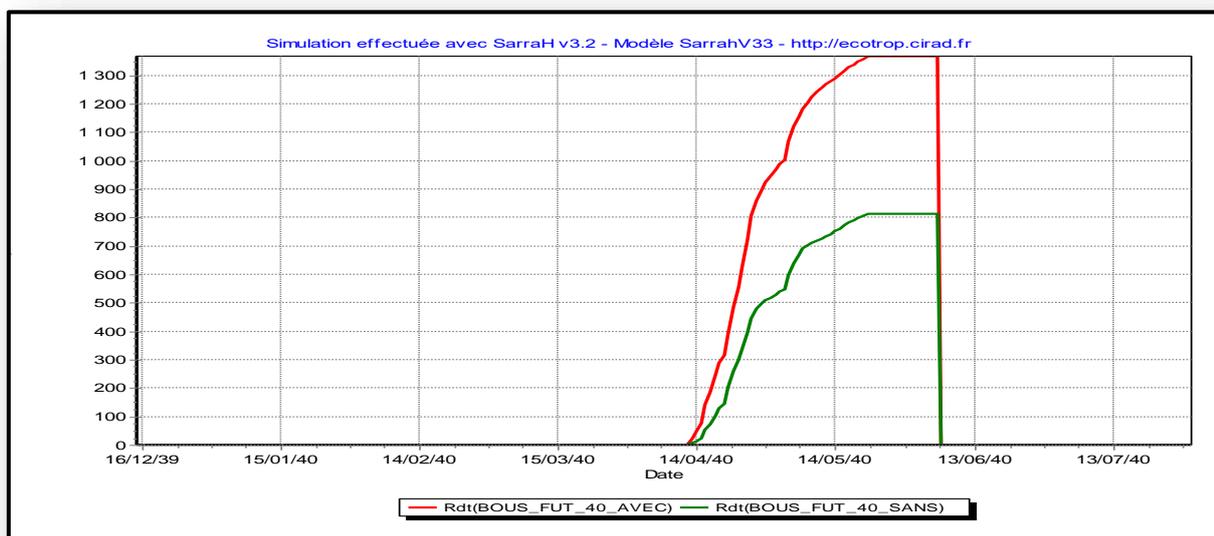


Figure 38. Simulation Boussalem sans et avec irrigation 2040.

La figure 39 représente la simulation de la variété « Boussalem » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 814,19 kg/ha où l’irrigation a permis d’atteindre

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

une production maximale de 1367,54 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2040.

Les figures (40-46) représentent la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2022 jusqu'à 2040 tels que :

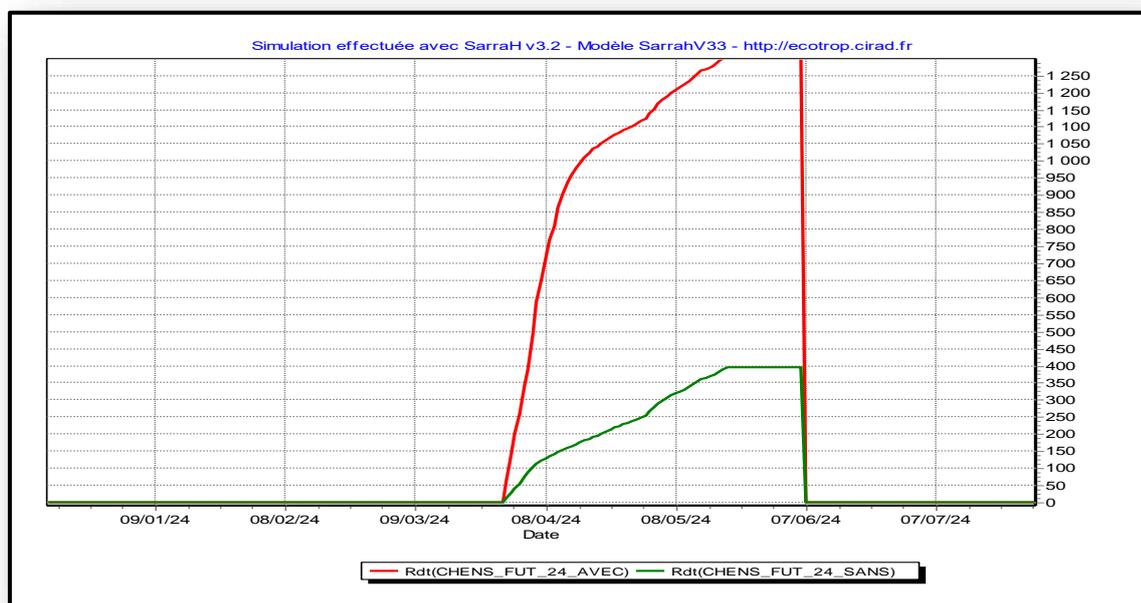


Figure 39. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2024.

La figure 40 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation pour l'année 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 395,01 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1308,49 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2024.

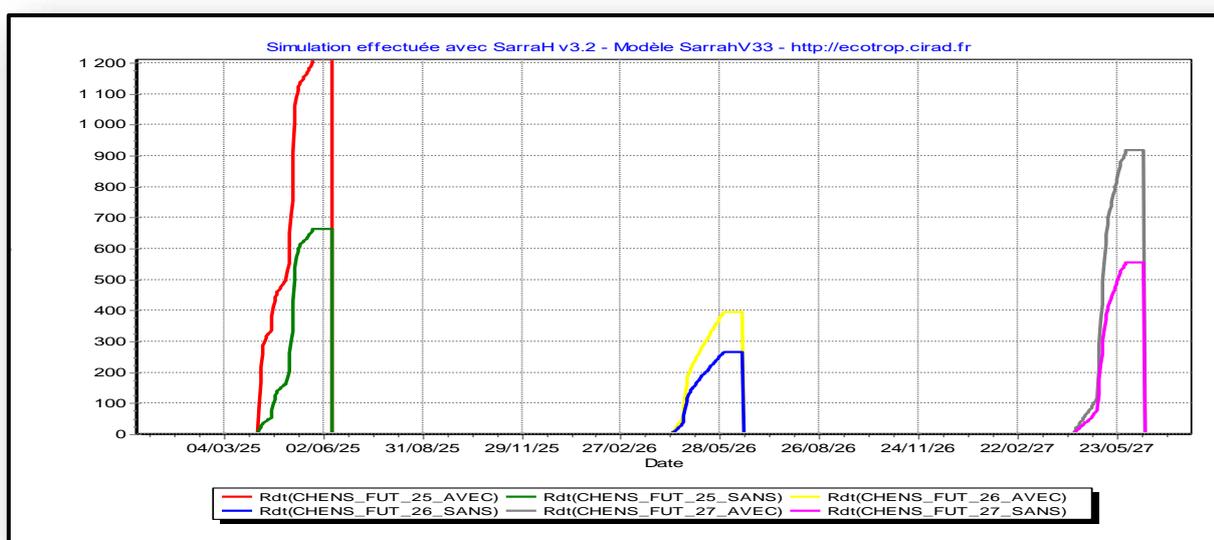


Figure 40. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2025-2027.

La figure 41 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2025 jusqu'à 2027. Le rendement en grain sans irrigation varie de 266,02 kg/ha (2026) à 662,06 kg/ha (2027) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1210,41 kg/ha en 2025. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2025 jusqu'à 2027.

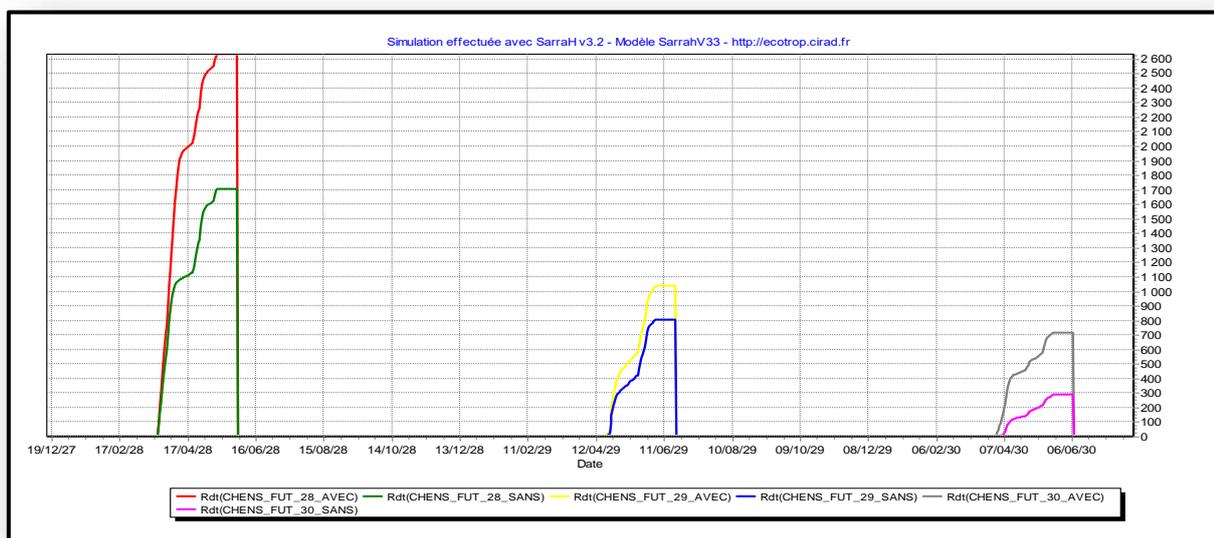


Figure 41. Simulation Chen's avec et sans irrigation 2028-2030.

La figure 42 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2028 jusqu'à 2030. Le rendement en grain sans irrigation varie de 289,39 kg/ha (2030) à 1706,77 kg/ha (2028) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2632,4088 kg /ha en 2028. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2028 jusqu'à 2030.

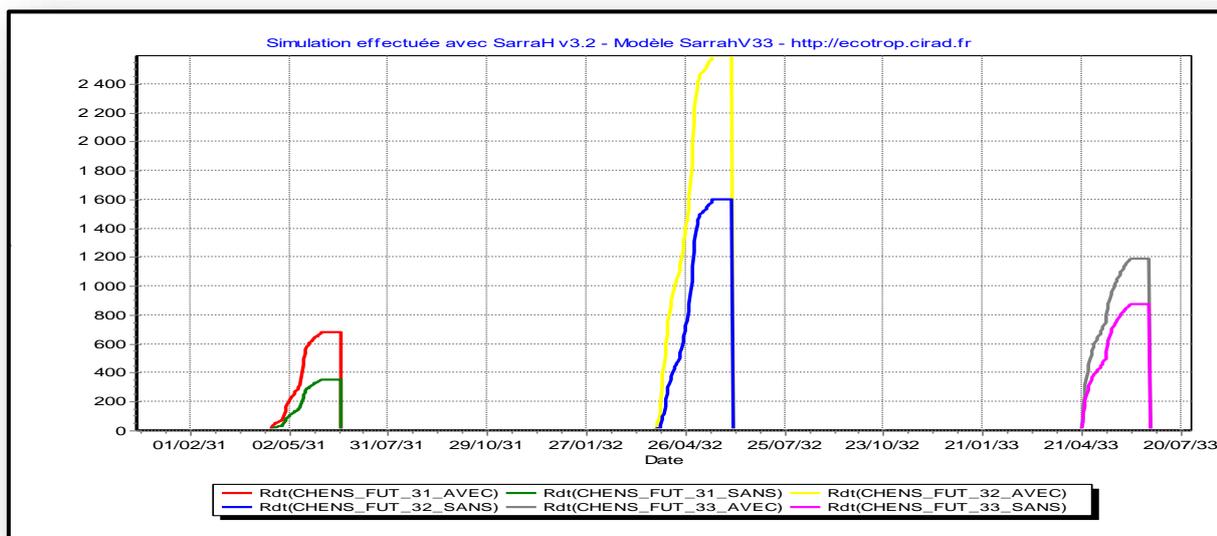


Figure 42. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2031-2033.

La figure 43 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2031 jusqu'à 2033. Le rendement en grain sans irrigation varie de 353,71 kg/ha (2031) à 1598,83 kg/ha (2032) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2593,18 kg/ha en 2032. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2031 jusqu'à 2033.

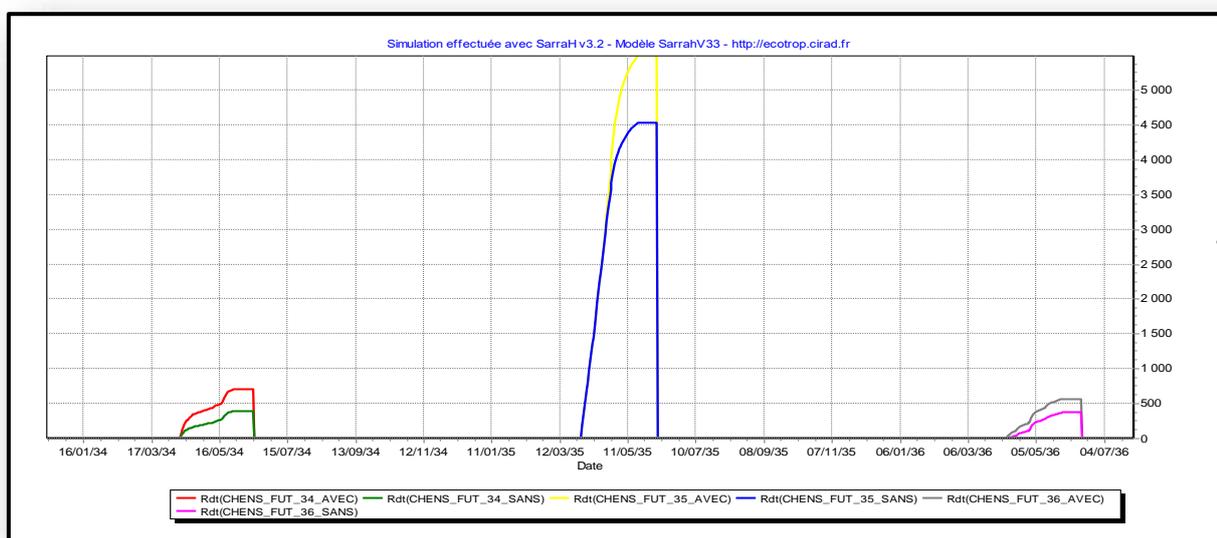


Figure 43. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2034-2036.

La figure 44 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2034 jusqu'à 2036. Le rendement en grain sans irrigation varie de 366,78 kg/ha (2036) à 4533,84

kg/ha (2035) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5491,02 kg/ha en 2035. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2034 jusqu'à 2036.

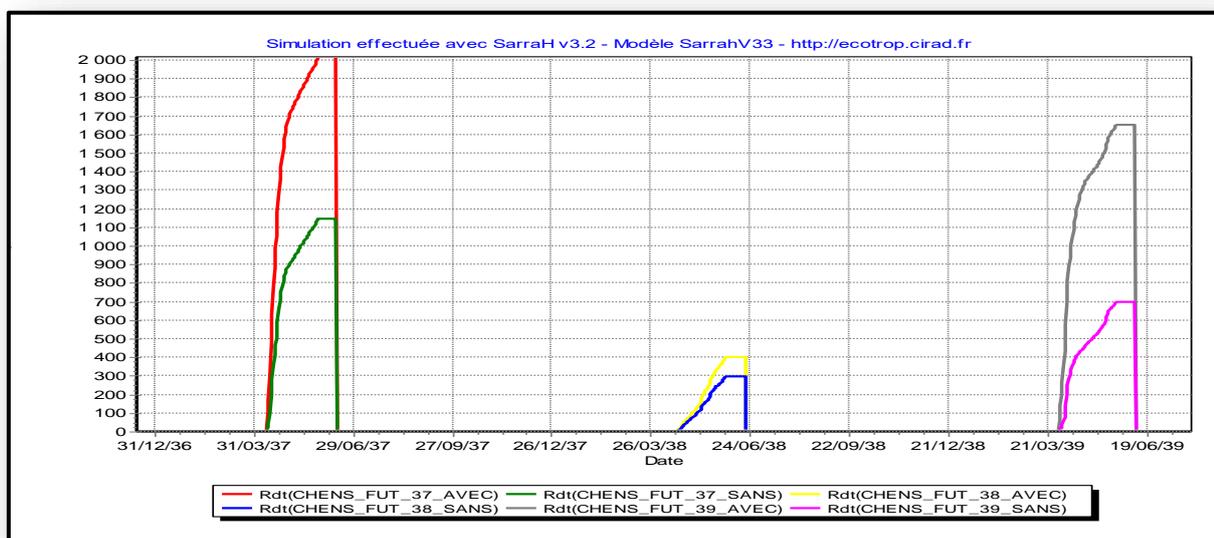


Figure 44. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2037-2039.

La figure 45 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation à partir de 2037 jusqu'à 2039. Le rendement en grain sans irrigation varie de 295,84 kg/ha (2038) à 1147,12 kg/ha (2037) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2017,39 kg/ha en 2037. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2037 jusqu'à 2039.

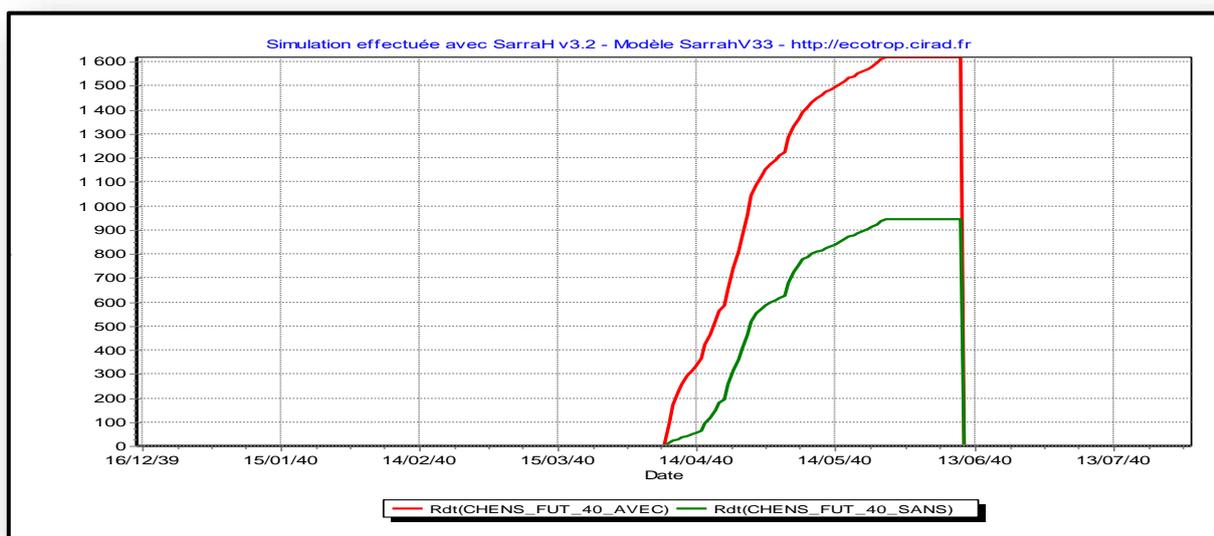


Figure 45. Simulation Chen's sans et avec irrigation 2040.

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

La figure 46 représente la simulation de la variété « Chen's » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 942,23 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1618,18 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2040.

Les figures (47-53) représentent la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2022 jusqu'à 2040 tels que :

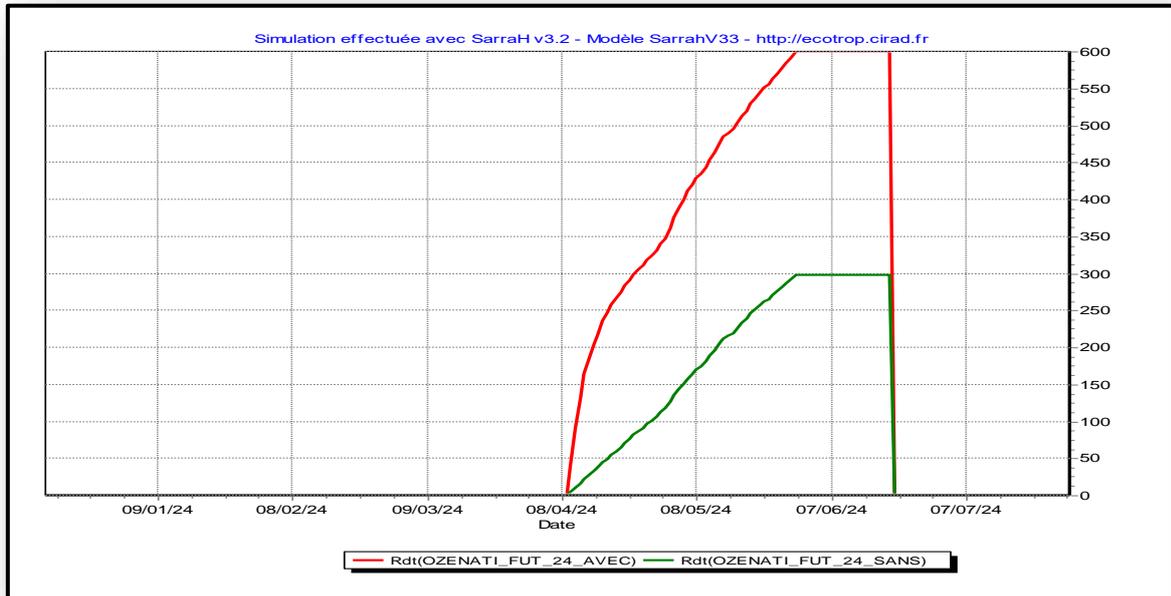


Figure 46. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2024.

La figure 47 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 298,68 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 600,44 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2024.

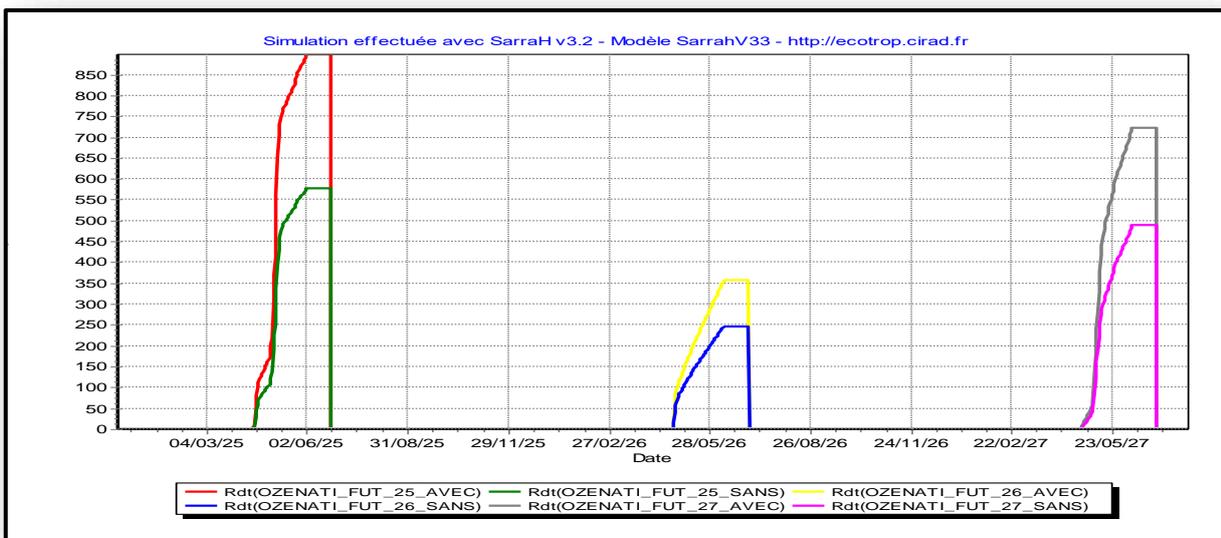


Figure 47. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2025-2027.

La figure 48 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2025 jusqu'à 2027. Le rendement en grain sans irrigation varie de 247,01 kg/ha (2026) à 576,63 kg/ha (2025) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 898,00 kg/ha en 2025. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2025 jusqu'à 2027.

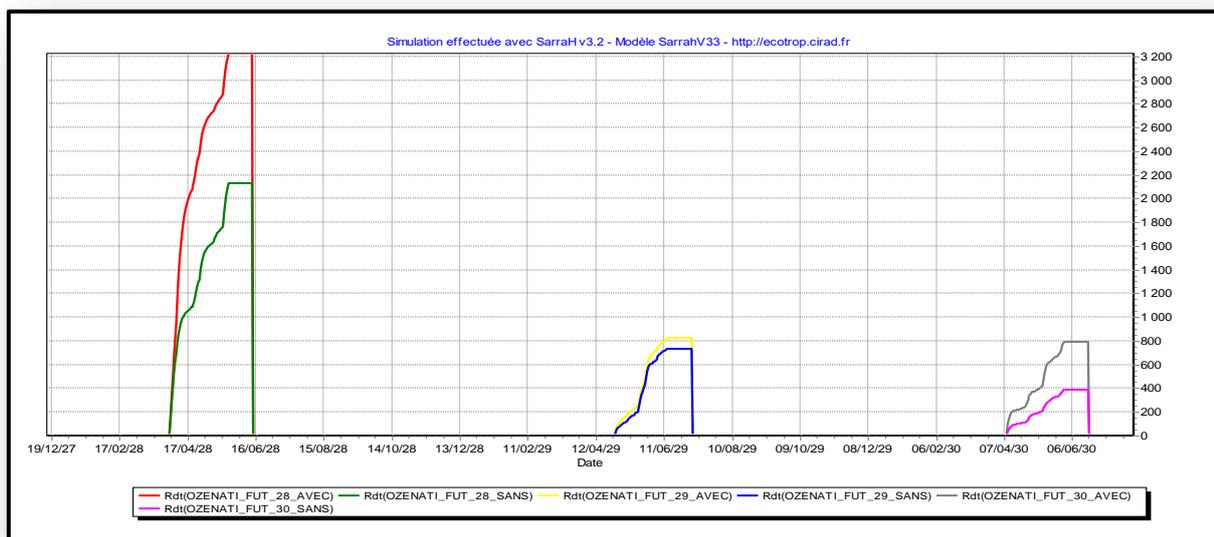


Figure 48. Simulation Ouedzenati avec et sans irrigation 2028-2030.

La figure 49 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2028 jusqu'à 2030. Le rendement en grain sans irrigation varie de 389,73 kg/ha (2030) à 2127,08 kg/ha (2028) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 3223,87 kg/ha en 2028. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2028 jusqu'à 2030.

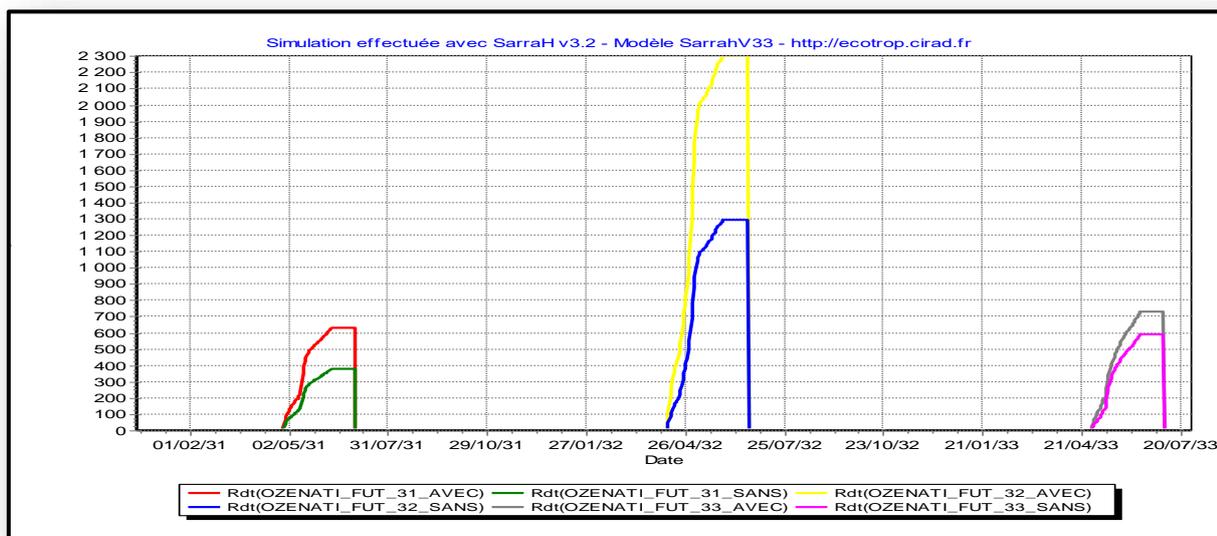


Figure 49. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2031-2033.

La figure 50 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2031 jusqu'à 2033. Le rendement en grain sans irrigation varie de 378,35 kg/ha (2031) à 1292,54 kg/ha (2032) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2301,95 kg/ha en 2032. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2031 jusqu'à 2033.

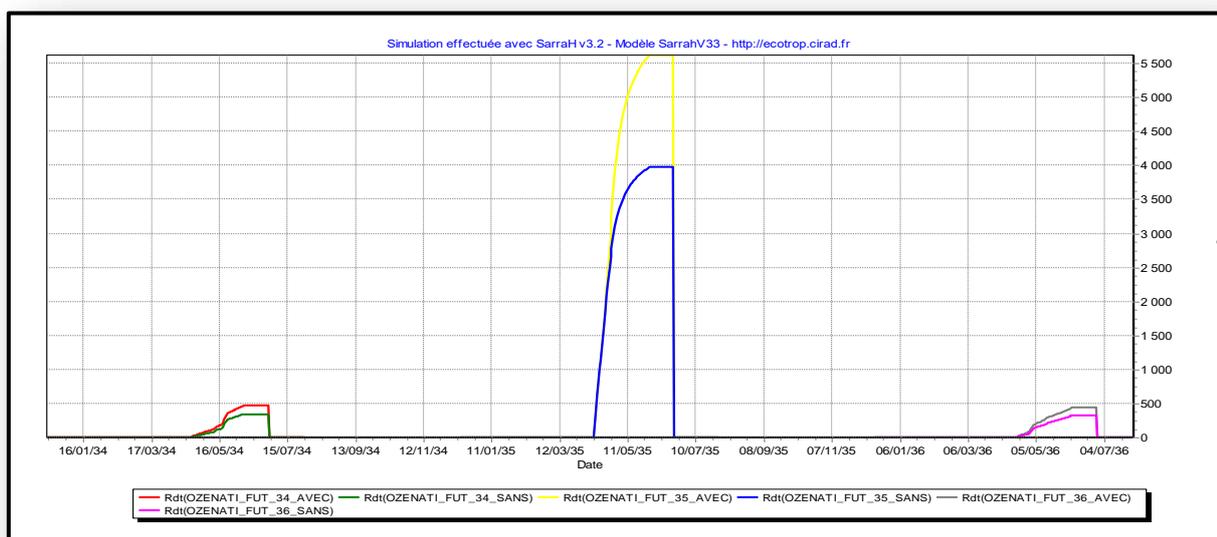


Figure 50. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2034-2036.

La figure 51 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2034 jusqu'à 2036. Le rendement en grain sans irrigation varie de 322,00 kg/ha (2036) à

3979,06 kg/ha (2035) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5619,35 kg/ha en 2035. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2034 jusqu'à 2036.

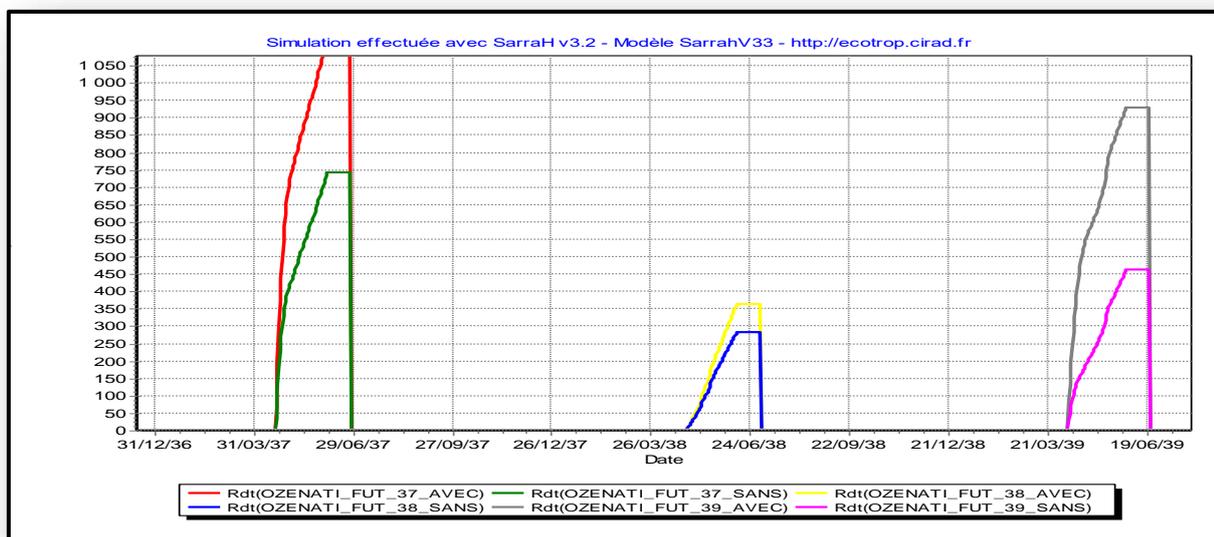


Figure 51. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2037-2039.

La figure 52 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation à partir de 2037 jusqu'à 2039. Le rendement en grain sans irrigation varie de 281,76 kg/ha (2038) à 742,98 kg/ha (2037) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1078,17 kg/ha en 2037. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour les années 2037 jusqu'à 2039.

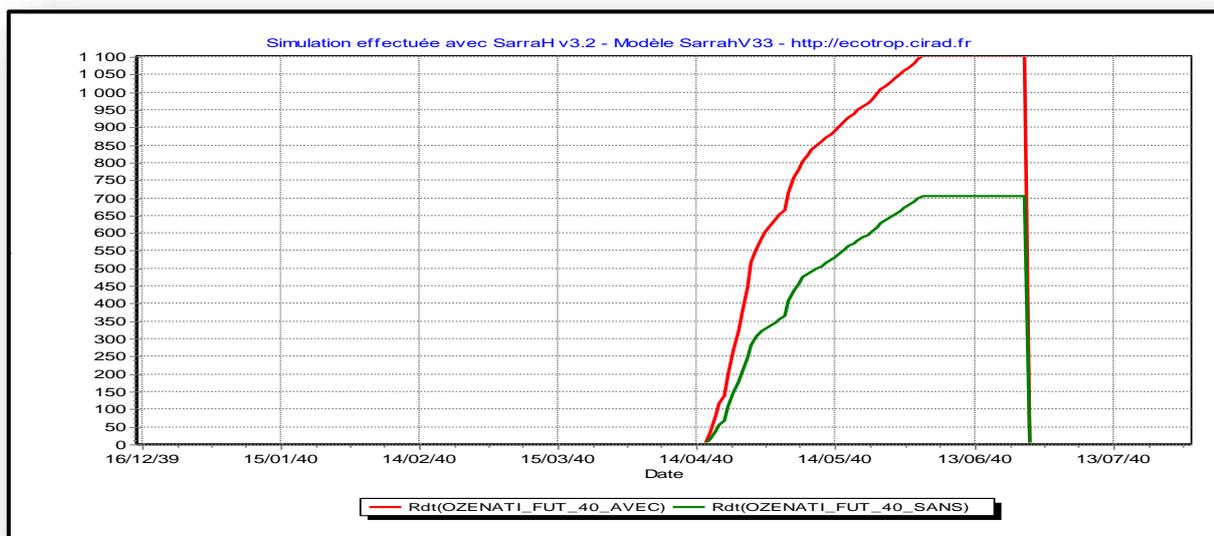


Figure 52. Simulation Ouedzenati sans et avec irrigation 2040.

La figure 53 représente la simulation de la variété « Ouedzenati » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 706,18 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1103,05 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2040.

Les figures (54-60) représentent la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2022 jusqu'à 2040 tels que :

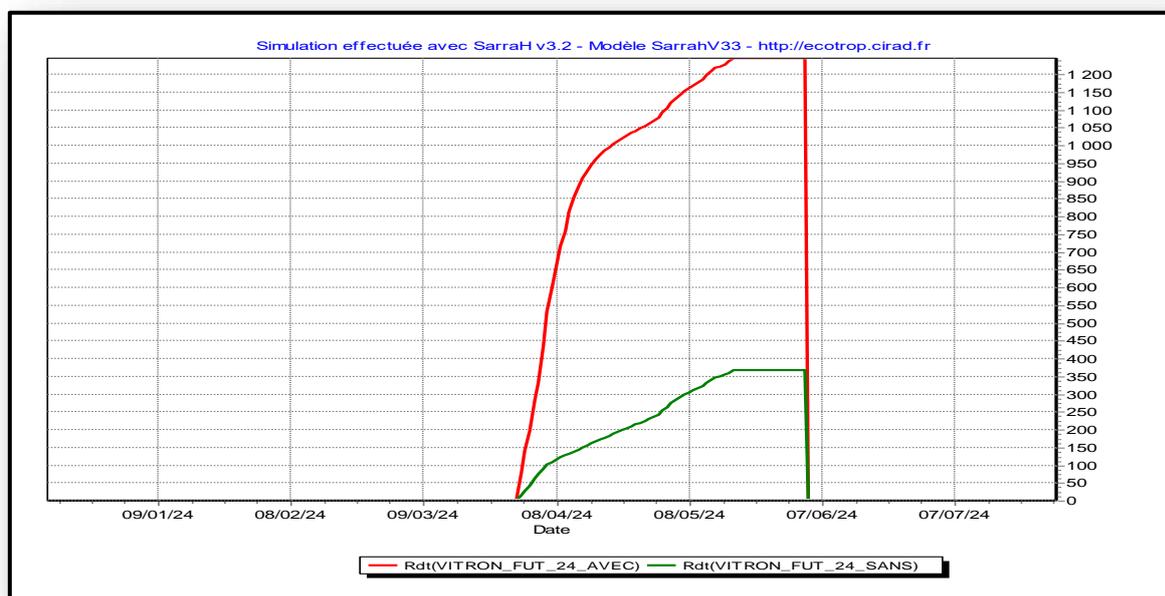


Figure 53. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2024.

La figure 54 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 367,38 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1245,14 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2024.

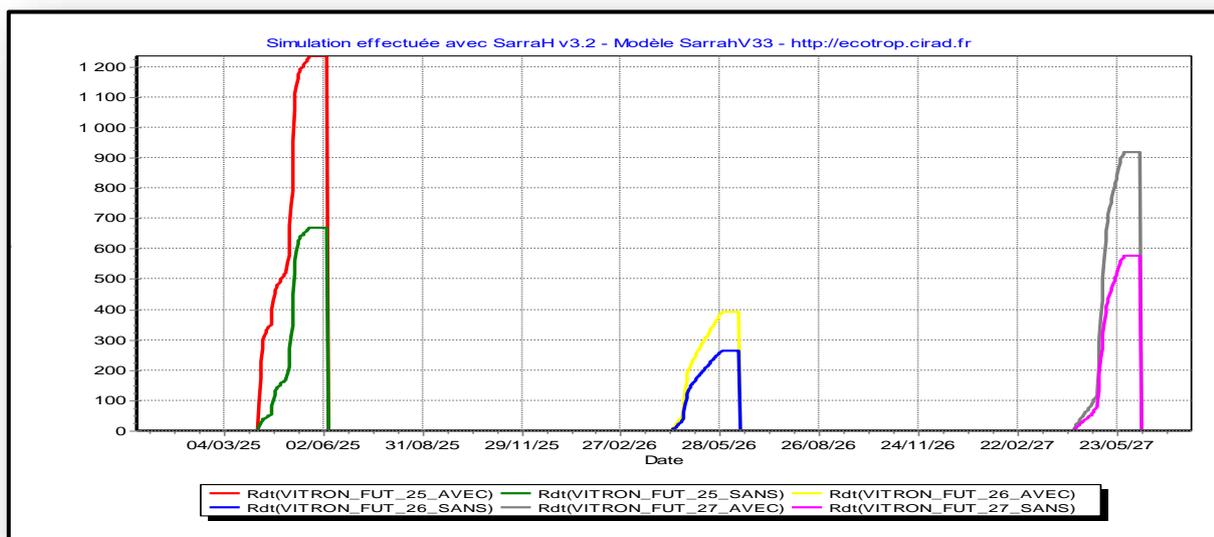


Figure 54. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2025-2027.

La figure 55 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2025 jusqu'à 2027. Le rendement en grain sans irrigation varie de 264,70 kg/ha (2026) à 668,86 kg/ha (2025) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1233,86 kg/ha en 2025. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2025 jusqu'à 2027.

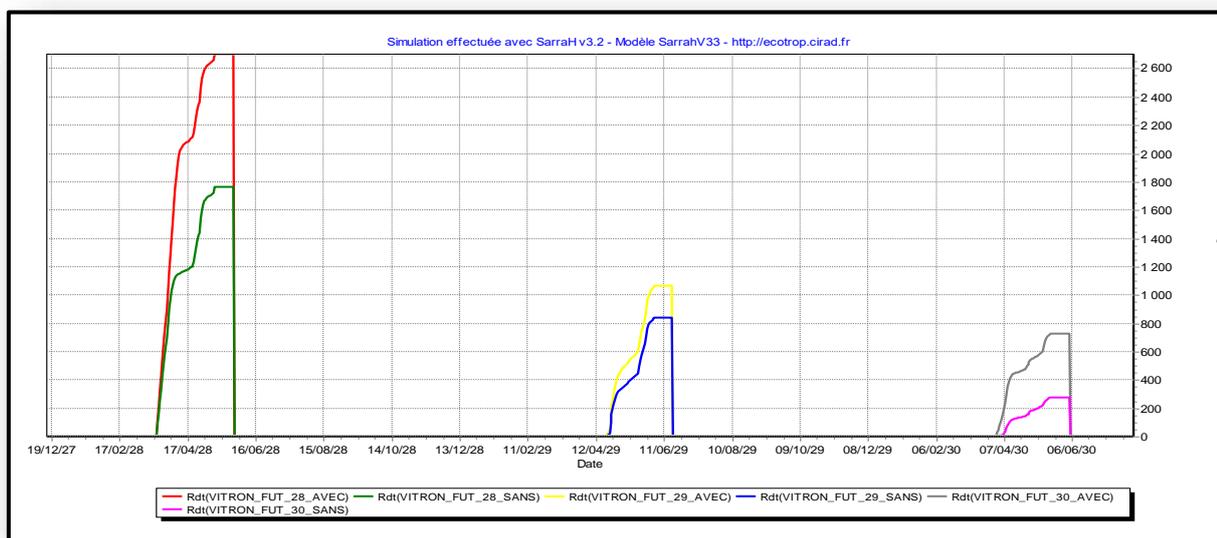


Figure 55. Simulation Vitron avec et sans irrigation 2028-2030.

La figure 56 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2028 jusqu'à 2030. Le rendement en grain sans irrigation varie de 277,91 kg/ha (2030) à 1760,61 kg/ha (2028) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2702,22 kg/ha en 2028. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2028 jusqu'à 2030.

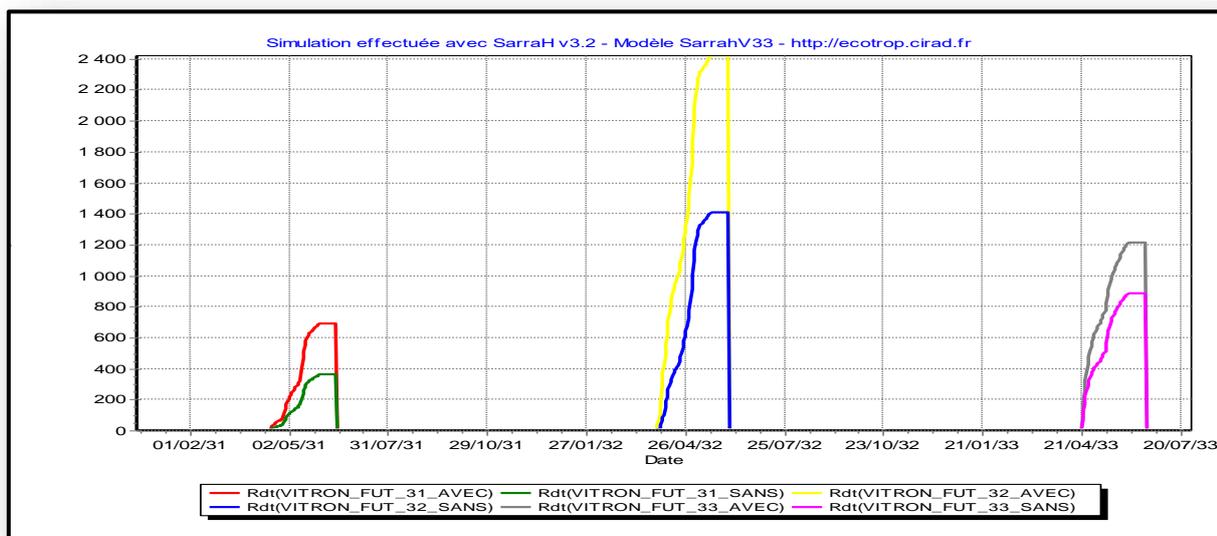


Figure 56. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2031-2033.

La figure 57 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2031 jusqu'à 2033. Le rendement en grain sans irrigation varie de 361,15 kg/ha (2031) à 1407,16 kg/ha (2032) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2419,27 kg/ha en 2032. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2031 jusqu'à 2033.

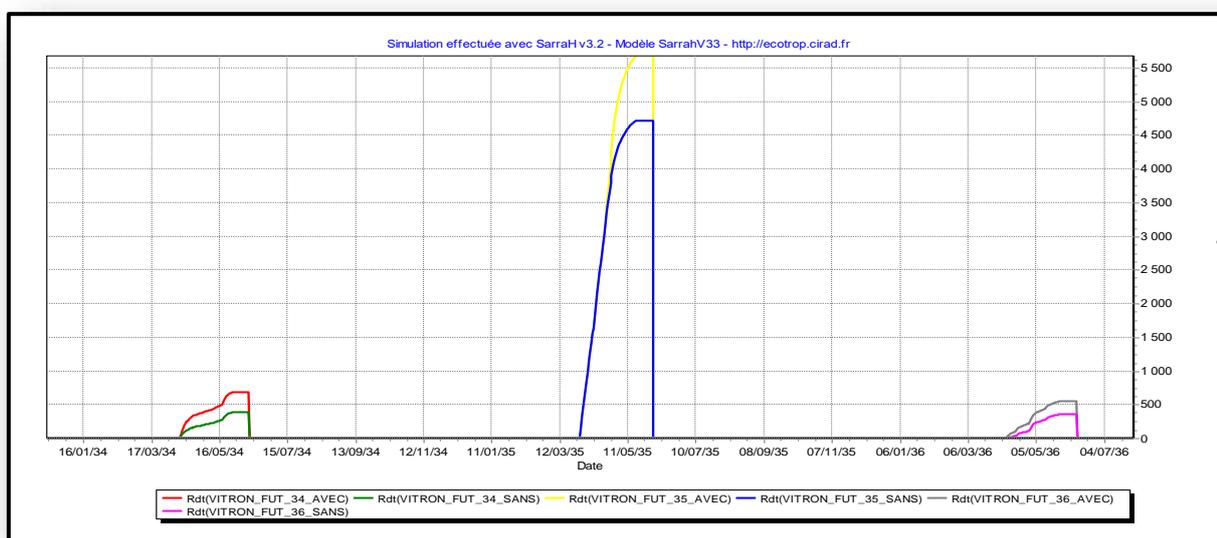


Figure 57. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2034-2036.

La figure 58 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2034 jusqu'à 2036. Le rendement en grain sans irrigation varie de 357,41 kg/ha (2036) à 4718,31

kg/ha (2035) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5677,92 kg/ha en 2035. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2034 jusqu'à 2036.

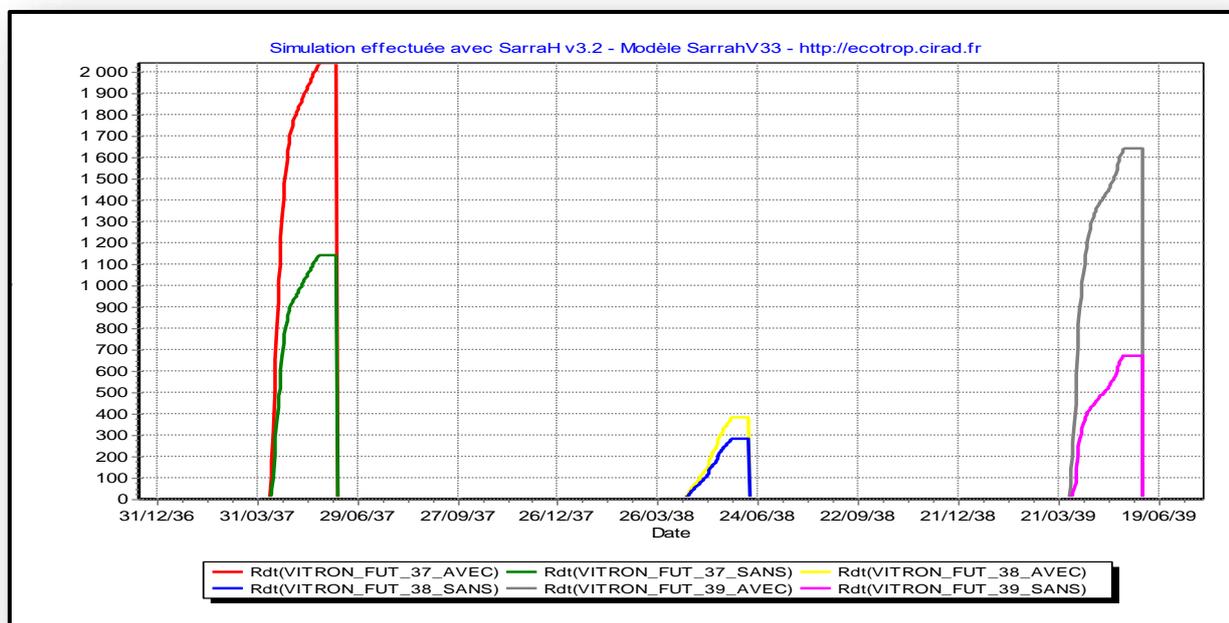


Figure 58. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2037-2039.

La figure 59 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation à partir de 2037 jusqu'à 2039. Le rendement en grain sans irrigation varie de 284,38 kg/ha (2038) à 1142,60 kg/ha (2037) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2040,42 kg/ha en 2037. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2037 jusqu'à 2039.

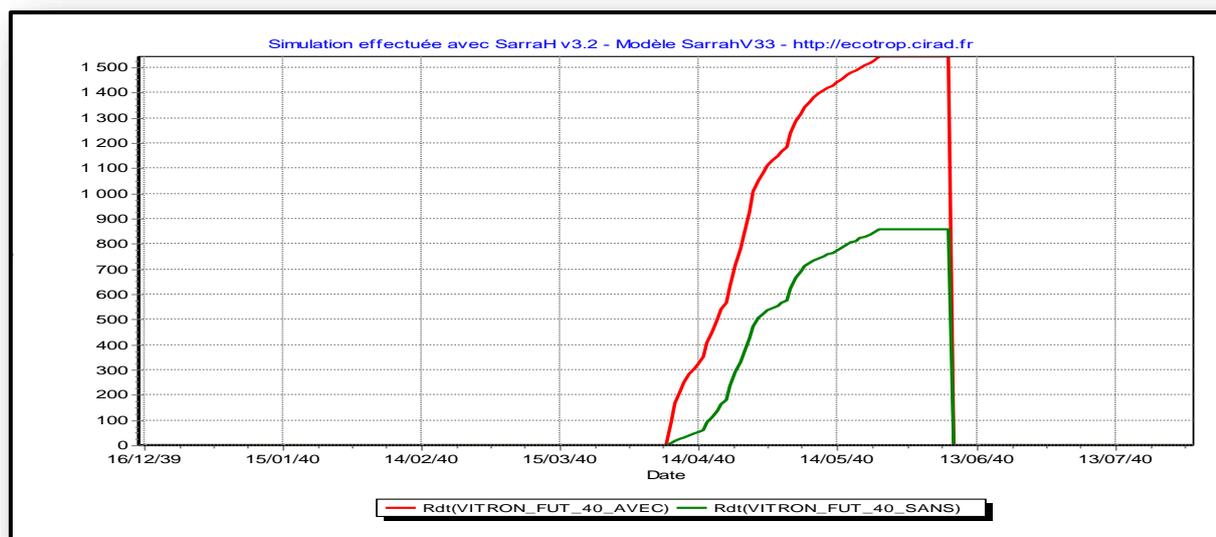


Figure 59. Simulation Vitron sans et avec irrigation 2040.

La figure 60 représente la simulation de la variété « Vitron » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 1543,45 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

production maximale de 858,01 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2040.

Les figures (61-67) représentent la simulation de la variété «Waha» avec et sans irrigation à partir de 2022 jusqu'à 2040 tels que :

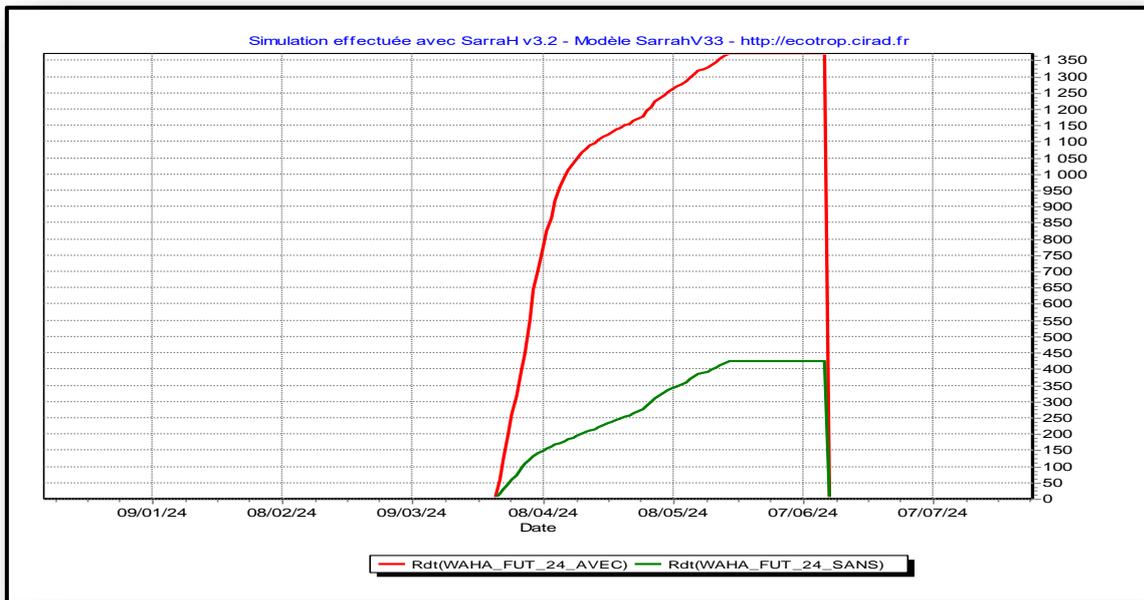


Figure 60. Simulation Waha sans et avec irrigation 2024.

La figure 61 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 422,92 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1370,75 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2024

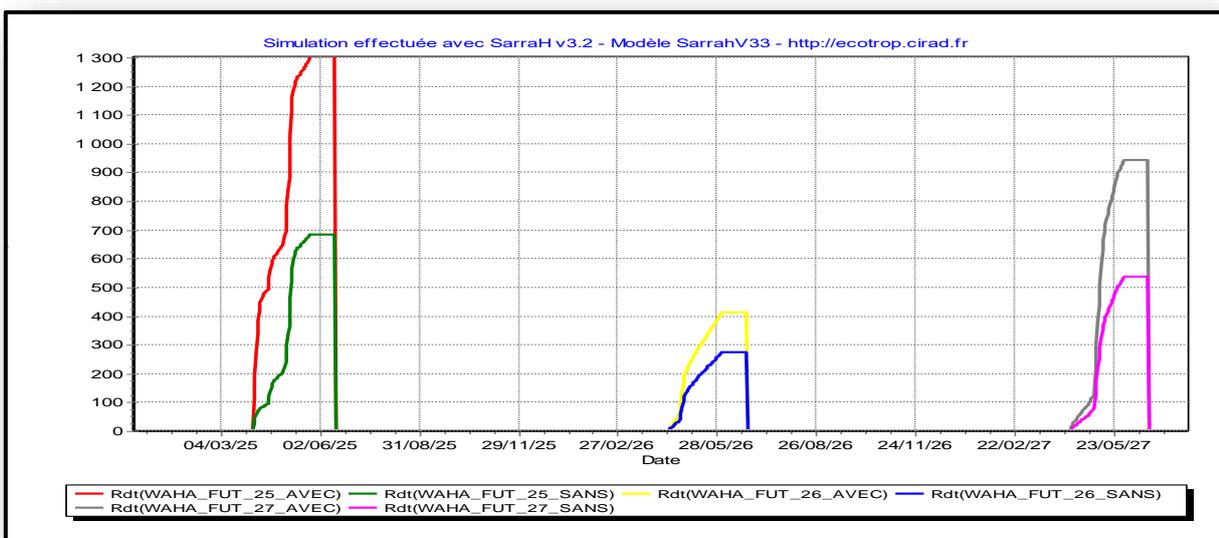


Figure 61. Simulation Waha sans et avec irrigation 2025-2027.

La figure 62 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2025 jusqu'à 2027. Le rendement en grain sans irrigation varie de 272,62 kg/ha (2026) à 685,73 kg/ha (2025) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1303,95 kg/ha en 2025. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2025 jusqu'à 2027.

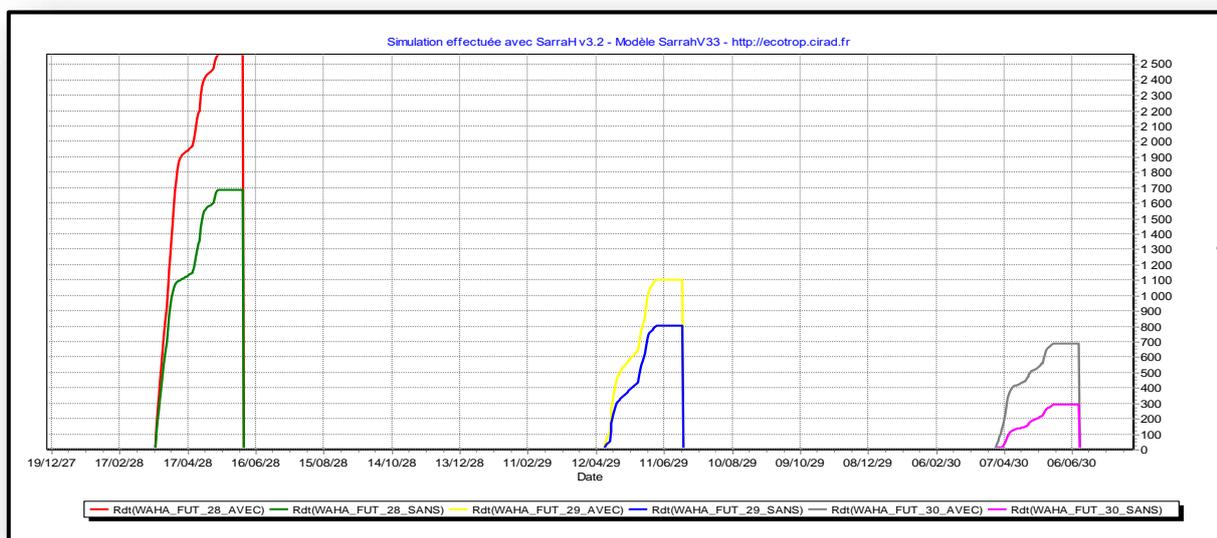


Figure 62. Simulation Waha avec et sans irrigation 2028-2030.

La figure 63 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2028 jusqu'à 2030. Le rendement en grain sans irrigation varie de 294,86 kg/ha (2030) à 1688,37 kg/ha (2028) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2566,96 kg/ha en 2028. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2028 jusqu'à 2030.

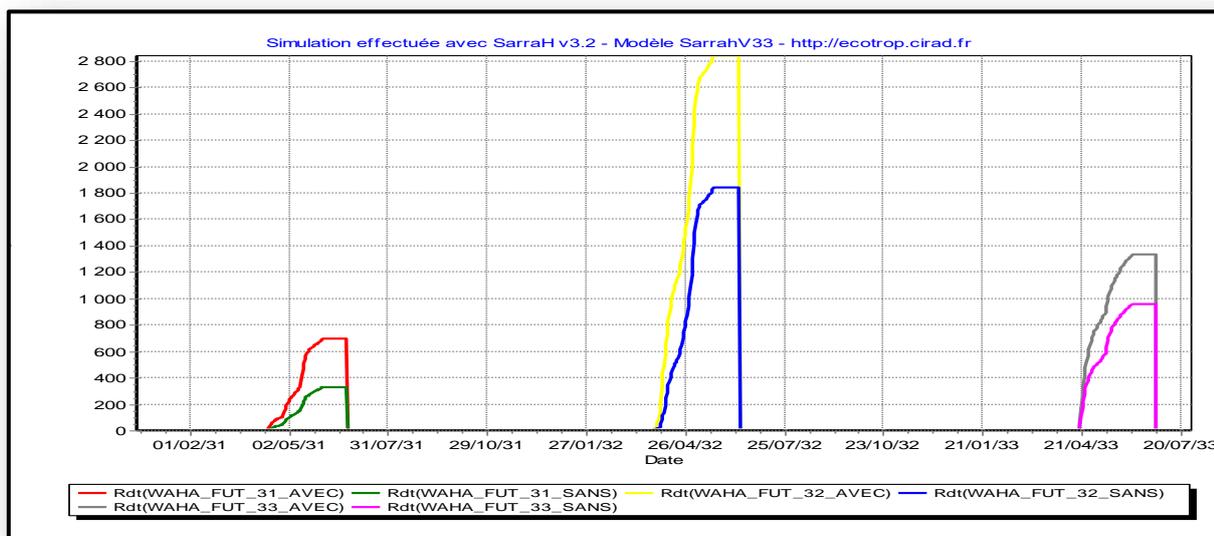


Figure 63. Simulation Waha sans et avec irrigation 2031-2033.

La figure 64 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2031 jusqu'à 2033. Le rendement en grain sans irrigation varie de 328,70 kg/ha (2031) à 1840,05 kg/ha (2032) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2838,90 kg/ha en 2032. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2031 jusqu'à 2033.

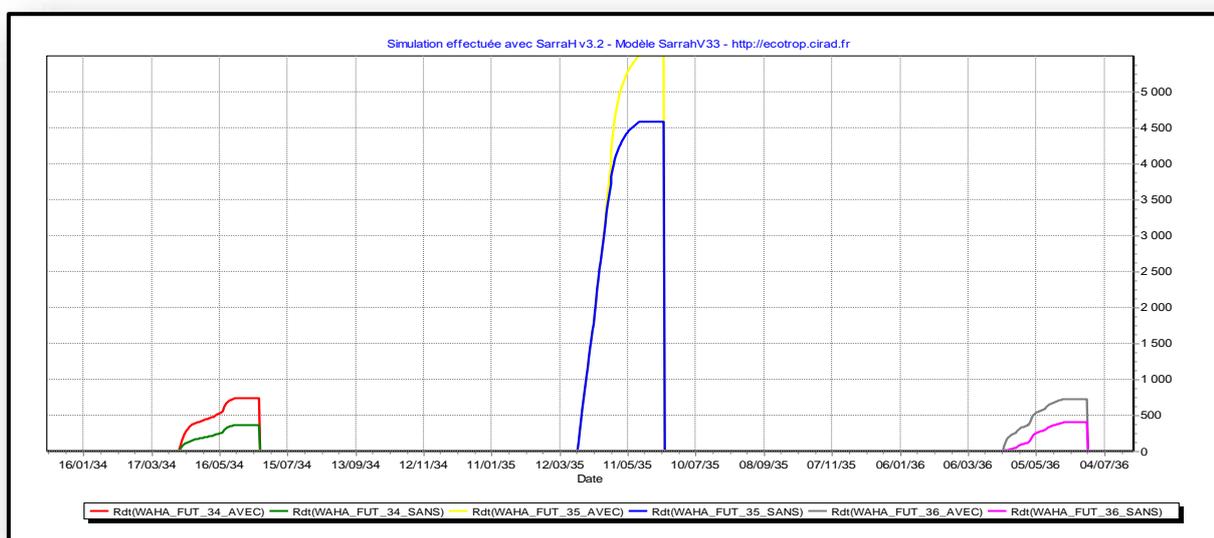


Figure 64. Simulation Waha sans et avec irrigation 2034-2036.

La figure 65 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2034 jusqu'à 2036. Le rendement en grain sans irrigation varie de 365,76 kg/ha (2034) à 4584,87

kg/ha (2035) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 5493,71 kg/ha en 2035. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2034 jusqu'à 2036.

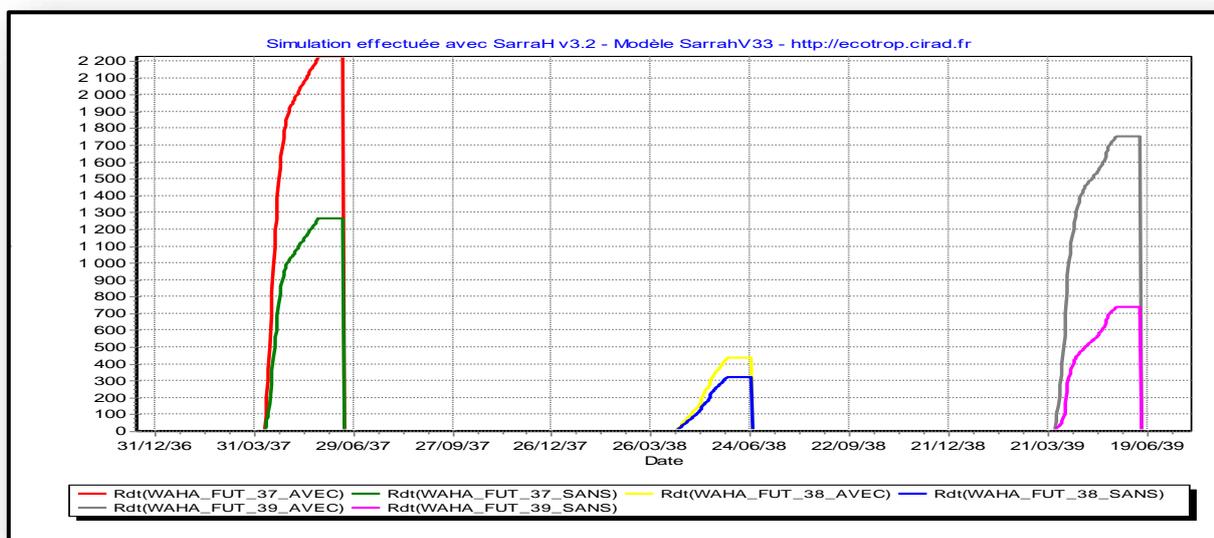


Figure 65. Simulation Waha sans et avec irrigation 2037-2039.

La figure 66 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation à partir de 2037 jusqu'à 2039. Le rendement en grain sans irrigation varie de 317,84 kg/ha (2038) à 1265,06 kg/ha (2037) où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 2226,56 kg/ha en 2037. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement les années 2037 jusqu'à 2039.

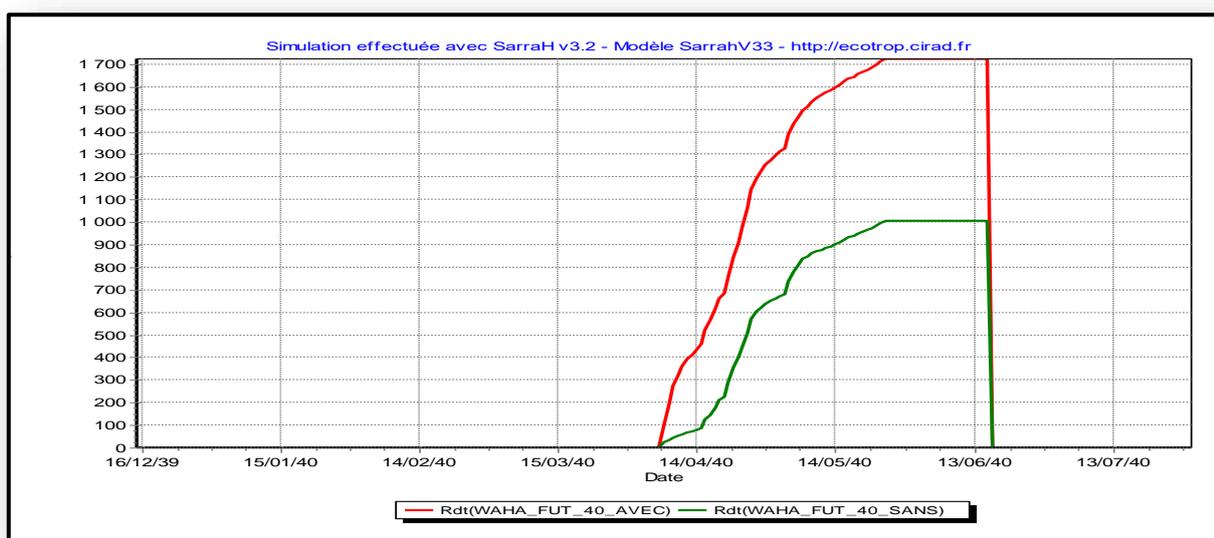


Figure 66. Simulation Waha sans et avec irrigation 2040.

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

La figure 67 représente la simulation de la variété « Waha » avec et sans irrigation de 2040. Le rendement en grain sans irrigation est de 1005,34 kg/ha où l'irrigation a permis d'atteindre une production maximale de 1723,24 kg/ha. À l'aide de l'irrigation on observe une amélioration du rendement pour l'année 2040.

Discussion

La réponse du rendement de blé dur aux différentes situations climatiques est variable selon les quantités de précipitations annuelles recueillies. En général, les meilleurs rendements sont attribués plutôt à la bonne distribution des précipitations selon les stades de grande sensibilité en eau qu'aux quantités cumulées sur toute l'année. L'irrigation de complément dite irrigation d'appoint, est conçue comme des apports d'eau permettant à la culture d'assurer une production en cas de déficit pluviométrique. Sous le régime pluvial, l'eau était le principal facteur limitant. En irrigué par contre, l'effet du déficit de pluviosité a été corrigé en partie par l'irrigation d'appoint ou de complément appliqué aux moments des déficits hydriques correspondants dans notre cas aux stades (d'épiaison, floraison, et stade remplissage). La dose optimale obtenue par le modèle SARRA-H « 15 mm » distribuée sur 3 jours du mois de février, mars et avril a été retenue comme base pour l'application d'une dose d'irrigation pour les années d'étude, prenant en considération la précocité et l'intensité du déficit pluviométrique. La pluviométrie moyenne sur la période février-avril pendant laquelle s'opère l'irrigation est de 9,8 mm en moyenne (les années 2001 à 2008) et de 18,98 mm (les années 2024-2040). Nous avons effectué la simulation pour les cinq variétés (Boussalem, Chen's, Ouedzenati, Vitron, Waha) en deux parties : une partie de calibration (passé) dont c'est la période de 2001 jusqu'à 2008 et une partie dont c'est la période de future de 2024 jusqu'à 2040. Les deux tableaux représentent la moyenne du rendement sans et avec irrigation et le taux d'évolution ou le pourcentage dont les effets positifs de l'irrigation se sont manifestés significativement sur les cinq variétés.

III.II.2.4. Partie calibration

Boussalem, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 3850,80 kg /ha contre 2311,22 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 223,65 %.

Chen's, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 3146,08 kg /ha contre 1986,34 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est significatif ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 76,49%.

Ouedzenati, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 2760,57 kg /ha contre 1872,05 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est plus modéré ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 62,70%.

Vitron, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 3208,64 kg /ha contre 2011,93 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est modéré ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement d'environ 30,14 %.

Waha, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 3174,62 kg /ha contre 1991,72 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est significatif ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 78,96 %.

| *Chapitre III : Matérielles et Méthodes*

On utilisera le critère principal du choix qui est le rendement pour comparer entre les variétés :

La réponse de la variété Boussalem à l'irrigation est d'autant plus forte que les autres variétés avec un pourcentage de 223,65 % tandis que la réponse de Waha était faiblement remarquée par rapport aux autres variétés avec un pourcentage d'environ 30,14%.

Tableau 5. Les moyennes de cinq variété (2001-2008)

| Variétés | Irrigation | Moyenne |
|------------|-------------|------------|
| Boussalem | Avec IR | 3850,80515 |
| | Sans IR | 2311,22476 |
| | Pourcentage | 223,65 |
| Chen's | Avec IR | 3146,0814 |
| | Sans IR | 1986,34274 |
| | Pourcentage | 76,4975 |
| Ouedzenati | Avec IR | 2760,57252 |
| | Sans IR | 1872,05122 |
| | Pourcentage | 62,7 |
| Vitron | Avec IR | 3208,64936 |
| | Sans IR | 2011,93116 |
| | Pourcentage | 30,138 |
| Waha | Avec IR | 3174,62526 |
| | Sans IR | 1991,72441 |
| | Pourcentage | 78,96 |

III.II.2.5. Partie future

Boussalem, l'irrigation de complément a permis d'obtenir des productions de moyenne de 1438,10 kg /ha contre 902,85 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 79,44 %.

Chen's, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 1434,32 kg /ha contre 893,67 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est significatif ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 80,81 %.

Ouedzenati, l'irrigation d'appoint à permis d'obtenir des productions de moyenne de 1192,39 kg /ha contre 787,73 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est plus modéré ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 56,13 %.

Vitron, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 1433,99 kg /ha contre 888,86 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est modéré ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement d'environ 85,99 %.

Waha, l'irrigation d'appoint a permis d'obtenir des productions de moyenne de 1505,97 kg /ha contre 929,48 kg/ha (régime purement pluvial) le niveau du rendement est augmenté par l'apport d'irrigation l'effet est significatif ce qui se traduit finalement par un accroissement du rendement de 116,01%.

Par comparaison la variété Waha a bien répondu à l'irrigation complémentaire avec un taux d'évolution de rendement de 116,01 % tandis que la variété Ouedzenati a faiblement répondu par rapport aux autres variétés avec un pourcentage de 56,13%.

Tableau 6. *Les moyennes de cinq variétés (2022-2040).*

| Variétés | Irrigation | Moyenne |
|-------------|------------|---------|
| Boussalem | Avec IR | 1438,10 |
| | Sans IR | 902,85 |
| Pourcentage | % | 79,44 |
| | | |
| Chen's | Avec IR | 1434,32 |
| | Sans IR | 893,67 |
| Pourcentage | % | 80,81 |
| | | |
| Ouedzenati | Avec IR | 1192,39 |
| | Sans IR | 787,73 |
| Pourcentage | % | 56,13 |
| | | |
| Vitron | Avec IR | 1433,99 |
| | Sans IR | 888,86 |
| Pourcentage | % | 85,99 |
| | | |
| Waha | Avec IR | 1505,97 |
| | Sans IR | 929,48 |
| Pourcentage | % | 116,01 |

Conclusion

En condition irriguée, les résultats menés pour le blé dur concluent à des augmentations parfois plus fortes qui permet d'accroître le rendement du blé dur en pluvial.

Le rendement atteint en irrigué est de 3850,80 kg/ha en moyenne pour un rendement en pluvial de 2311,22 kg/ha pour la période de (2001-2008) et de 1505,97 kg/ha par l'irrigation en moyenne pour un rendement en pluvial de 929,48 kg/ha pour la période (2024-2040), soit une augmentation relative de 88,5 % pour 15 mm apporté en moyenne pour chaque mois sur 3 jours. Cet apport limité permet de stabiliser la production et de la situer au niveau requis pour combler le déficit de productivité. On peut conclure donc que les cinq variétés (Boussalem, Chen's, Ouedzenati, Vitron et Waha) sont instables en pluvial doivent recevoir systématiquement des irrigations de complément, mais aussi que des variétés à bon potentiel et assez tolérantes à la sécheresse telles que Boussalem et Waha valorisent bien l'irrigation de complément.

Conclusion générale

Pour un produit aussi stratégique, comme le blé dur et avec un déficit important de production en Algérie, il est impératif de recourir à tous les moyens, pour augmenter le rendement et compenser l'effet de changement climatique sur cette culture. Parmi les techniques proposées, l'irrigation complémentaire se montre efficace dans de nombreux pays méditerranéens.

Le recours à cette technique permet de concilier les faibles disponibilités hydriques et le besoin d'une production relativement élevée. Son application à grande échelle peut être une source d'amélioration des productions en zones semi arides.

L'irrigation complémentaire peut se faire par une ou plusieurs irrigations à des stades critiques de la croissance de la plante. Ces irrigations pourront augmenter le rendement jusqu'au double. Mais la décision d'irriguer dépend du régime climatique et de la disponibilité de l'eau d'irrigation, ainsi que le coût résultant de l'application d'une ou de plusieurs irrigations.

D'autre part les objectifs de l'irrigation complémentaire se résument en plusieurs points :

- Optimiser le rendement dans des lieux où le déficit de l'eau est occasionnel et de courte durée.
- Optimiser les limites disponibles naturelles et les ressources d'irrigation.
- Une solution pour réduire l'effet de changement climatique sur la culture de blé dur.

L'analyse des résultats des deux essais montre l'importance de la réponse à l'eau d'une culture de blé dur conduite sous différents régimes hydriques. Le premier essai conduit en pluvial qui sert de témoin pour le deuxième essai ce dernier ayant pour but de quantifier les effets bénéfiques d'une irrigation complémentaire apportée à différentes phases phénologiques de la période de reproduction sur les principales composantes du rendement.

La comparaison des résultats obtenus pour le premier essai confirme la mauvaise performance du traitement pluvial par rapport au traitement irrigué pour toutes les composantes du rendement.

Concernant les résultats de la simulation de futur, grâce à la technique culturelle suivie, on a arrivé à deux objectifs :

- Compenser l'effet de changement climatique sur le rendement de blé dur.
- Améliorer le rendement en grain de blé dur dans la région de Sidi Bel Abbes.

Ces résultats nous encouragent de travailler sur les irrigations intelligentes au futur et de pousser l'agriculteur à suivre une technique culturelle basée sur une irrigation complémenta

| Bibliographie

- [1] Kajla M, VK Yadav, RS Chhokar and RK Sharma. 2015. Management practices to mitigate the impact of high temperature on wheat. *Journal of Wheat Research* 7(1):1-12
- [2] J. Tack, A. Barkley, and L. L. Nalley, "Effect of warming temperatures on US wheat yields," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 112, no. 22, pp. 6931–6936, Jun. 2015, doi: 10.1073/pnas.1415181112.
- [3] J. Knox, T. Hess, A. Daccache, and T. Wheeler, "Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia," *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 3, p. 034032, Sep. 2012, doi: 10.1088/1748-9326/7/3/034032.
- [4] J. G. Nuttall, G. J. O'Leary, J. F. Panozzo, C. K. Walker, K. M. Barlow, and G. J. Fitzgerald, "Models of grain quality in wheat—A review," *Field Crops Research*, vol. 202, pp. 136–145, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.fcr.2015.12.011.
- [5] C. Baron et al., "From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact," *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 360, no. 1463, pp. 2095–2108, Nov. 2005, doi: 10.1098/rstb.2005.174[9] M. Abid, J. Scheffran, U. A. Schneider, and M. Ashfaq, "Farmers' perceptions of and adaptation strategies to climate change and their determinants: the case of Punjab province, Pakistan," *Earth Syst. Dynam.*, vol. 6, no. 1, pp. 225–243, May 2015, doi: 10.5194/esd-6-225-2015.
- [6] ITGC (1998) ==> TGC. 1998. Programme intensification céréalière. Caractérisation. 123 pages.
- [7] I. technique des grandes cultures (Alger), L'irrigation d'appoint des céréales d'hiver. ITGC.
- [8] Bilan 2007 des changements climatiques rapport de synthèse. Geneve: GIEC, 2008.
- [9] K. Mostefa-Kara, La menace climatique en Algérie en [i.e. et] en Afrique: les inéluctables solutions. Algiers? Dahlab, 2008.
- [10] A. Mariotti, Y. Pan, N. Zeng, and A. Alessandri, "Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability," *Clim Dyn*, vol. 44, no. 5–6, pp. 1437–1456, Mar. 2015, doi: 10.1007/s00382-015-2487-3.
- [11] Farah A. K., 2014. Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Mémoire de magistère, Université de Constantine, Algérie, 127 p.
- [12] F. Giorgi, "Climate change hot-spots," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, no. 8, p. L08707, 2006, doi: 10.1029/2006GL025734.
- [13] Nedjraoui D ; Bedrani.S (2008) : la désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Volume 8 Numéro 1 | avril
- [14] B. Seguin, "Le changement climatique : conséquences pour les végétaux," *quaderni*, no. 71, pp. 27–40, Jan. 2010, doi: 10.4000/quaderni.525.
- [15] B. Seguin and F. Lefèvre, "Les impacts du changement climatique sur l'agriculture et la forêt".
- [16] L. Hakima and A. Atmane, "LES CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE DEVELOPPEMENT DE L'AGRICULTURE EN ALGERIE : QUELLES STRATEGIES D'ADAPTATION FACE A LA RARETE DE L'EAU ?," *مجلة العلوم الاقتصادية والتسيير والعلوم التجارية*, vol. 3, no. 3, pp. 19–32, 2010.
- [17] R. J. Stern and P. Johnson, "Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis," *Earth-Science Reviews*, vol. 101, no. 1–2, pp. 29–67, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.earscirev.2010.01.002.
- [18] M. Moriondo and M. Bindi, "IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE PHENOLOGY OF TYPICAL MEDITERRANEAN CROPS," 2007.
- [19] Rapport de Plan National de Climat. 2012
- [20] Journal de CREAD7, 2018.

| Bibliographie

- [21] A. Menzel and N. Estrella, "Plant Phenological Changes," in "Fingerprints" of Climate Change, G.-R. Walther, C. A. Burga, and P. J. Edwards, Eds., Boston, MA: Springer US, 2001, pp. 123–137. doi: 10.1007/978-1-4419-8692-4_8.
- [22] H. L. Wang et al., "Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 148, no. 8–9, pp. 1242–1251, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.agrformet.2008.03.003.
- [23] Guerenã A. Ruiz-Ramos M. Diaz-Ambrona CH. Conde J. Minguez MI. (2001) Assessment of climate change and agriculture in Spain using climate models. *Agron J* 93:237-249.
- [24] C. Giannakopoulos, P. Le Sager, M. Bindi, M. Moriondo, E. Kostopoulou, and C. M. Goodess, "Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming," *Global and Planetary Change*, vol. 68, no. 3, pp. 209–224, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.06.001.
- [25] Moriondo, M., Giannakopoulos, C., Bindi, M., 2011. Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Clim. Change* 104, 679–701.
- [26] D. Ventrella et al., "Climate change impact on crop rotations of winter durum wheat and tomato in southern Italy: yield analysis and soil fertility," *Ital J Agronomy*, vol. 7, no. 1, p. 15, Mar. 2012, doi: 10.4081/ija.2012.e15.
- [29] IPCC, «Climat change,» 2007. [En ligne]. Available: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/voir>.
- [30] Seguin B. Stegel .(2002) Changements climatiques et effet de serre. Technical report, INRA mensuel.
- [31] Farquhar GD. Dubbe DR. Raschke K. (1978) Gain of the feedback loop involving carbon dioxide and stomata. *Plant Physiol*: 62: 406-412.
- [32] Seneweera SP. Conroy JP. (2005) Enhanced leaf elongation rates of wheat at elevated CO₂: is it related to carbon and nitrogen dynamics within the growing leaf blade? *Environ Exp Bot* 54: 174-181. doi:10.1016/j.envexpbot.(2004) 07.002.
- [33] Lounis, *L'effet de fractionnement d'une seule dose d'azote sur la production de blé dur (Triticum durum) variété Simeto dans la zone d'Ouarizane.*, RELIZANE, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2010, p. 62.
- [34] A. S. Ait Kaki, *Contribution à l'étude de l'interaction génotype x milieu, pour la qualité technologiques chez le blé dur en Algérie*, Annaba: Université de Badji Mokhtar, 2008, pp. 107-120.
- [35] MADR, «statistiques-agricoles,» 2018. [En ligne]. Available: <http://fr.madr.gov.dz/agriculture/statistiques-agricoles/>.
- [36] Algerie-Eco, 2022. [En ligne]. Available: <https://www.algerie-eco.com>.
- [37] R. S. A. Hervieu B., *The challenge posed by the cereals sector in the Mediterranean.*, Ciheam analytical note, N°9, 2006, p. 14.
- [38] R. Kellou, Analyse du marché algérien du blé dur et les opportunités d'exportation pour les céréaliers français dans le cadre du pôle de compétitivité Quali-Méditerranée: Le cas des coopératives Sud Céréales, Groupe coopératif Occitan et Audecoop. in Série "Master of science," no. no 93. Montpellier: CIHEAM-IAMM, 2008.
- [39] P. Gate, *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*, Lavoisier, 1995, p. 429.
- [40] M. C, *PHYTOTECHEMIE SPÉCIALE TOME II : CÉRÉALES*, PARIS: La maison rustique, 1971, p. 94.
- [41] C. M. J. Prats, *Les céréales Collections d'enseignement agricole*, 2 éd., Ballier France, 1971, p. 351.
- [42] ITGC, *Fiche Technique de Blé Dur*, 2019, p. 5.

| Bibliographie

- [43] Soltner, Les grandes productions végétales céréalières, plantes sarclées- prairies, 20 éd., collection sciences techniques agricoles, 2005, p. 464.
- [44] B. N. M. R. Paul, L'amélioration variétale et les autres actions contribuant à la sécurité alimentaire en Tunisie en matière de céréales. Sécheresse, 10 éd., 1999, pp. 27-33.
- [45] C. Moule, Bases scientifiques et techniques de la production des principales espèces de grande culture en France, Paris: Miason Rustique, 1980, p. 319.
- [46] M. M. Bio., Fiches techniques #3 : Culture du blé dur en Bio, 2017, p. 4.
- [47] G. D. M. T. H. M. B. A. A. T. B. Hamid, GUIDE DES BONNES PRATIQUES DE LA CEREALICULTURE, 2021, p. 29.
- [48] wikifarmer, 2018. [En ligne]. Available: <https://wikifarmer.com/fr/principes-de-selection-des-meilleures-varietes-de-ble/>.
- [49] ITGC, GUIDE DES VARIÉTÉS DES CÉRÉALES NOUVELLEMENT INSCRITES EN ALGÉRIE, 2019, p. 41.
- [50] M. MARGUERIE, Fiches techniques #3 : Culture du blé dur en Bio., 2017, p. 4.
- [51] ARVALIS, GUIDE DU BLE DUR EN REGION CENTRE ET ILE DE FRANCE, 2021, p. 38.
- [52] J. D. F. F. J. G. C. L. P. L. T. P. Alain ALLIÈS, Fiche technique Blé dur : LES BASES de la CULTURE, 2018, p. 4.
- [53] G. Dysson, Physiologie et biologie des plantes vasculaires. Tome III. 1ère partie : Nutrition et métabolisme., Paris: SEDES, 1970, p. 291.
- [54] B. NORA, action de cinq provenances de porte - greffes francs d'abricotier (*Prunus armeniaca*. L) au déficit hydrique. Tolérance à la sécheresse, 2005, p. 123.
- [55] A. A. B. H. S. A. Chennafi H, Yield response of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivar Waha to déficit irrigation under semi-arid growth conditions., 2006, pp. 854-860.
- [56] A. A. A. C. Mefti A., Etude de la tolérance à la sécheresse chez quelques populations de *Medicago truncatula* (L.), 2000, pp. 165-174.
- [57] L. W, Physiologie plant écologie, 4ème édition éd., 2001, p. 350.
- [58] P. Mazliak and D. Laval-Martin, Nutrition et métabolisme, Nouv. éd. in Physiologie végétale, no. 1. Paris: Hermann, 1995.
- [59] B. Ch, Etude fréquentielle du climat, son influence sur la production des principales zones céréalières d'Algérie., Paris, 1974.
- [60] D. Soltner, Les grandes productions végétales : Céréales, plantes sarclées, prairies., 17 ème éd., 1990, p. 464.
- [61] T. W. & R. H. A. Hegarty, Differential sensitivity to moisture stress of seed germination and seedling radicle growth in calabrese (*Brassica oleracea* var. *italica*) and cress (*Lepidium sativum*)., vol. 42, 1978, p. 1003–1005.
- [62] E. H. L. H. B. E. A. K. Assem N, Effets du stress hydrique appliqué au stade trois feuilles sur le rendement en grains de dix variétés de blé cultivées au Maroc oriental, 17 éd., Sécheresse, 2006, pp. 499-505.
- [63] T. F. S. T. Bouchabke O., Leaf growth and turgor in growing cells of maize (*Zea mays* L.) respond to evaporative demand under moderate irrigation but not in water saturated soil., 29 éd., Plant Cell and Environment, 2006, pp. 1138-1148.
- [64] K. Y., Etude de caractères morpho physiologiques d'adaptation à la sécheresse du blé dur et de quelques espèces apparentées, Intérêt potentiel de ces espèces pour l'amélioration de ces caractères., 2001.
- [65] L. Z. S. M. S. S. & H. Z. Shao H.B., Investigation of dynamic changes of photosynthetic characteristics of 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes during two vegetative-growth

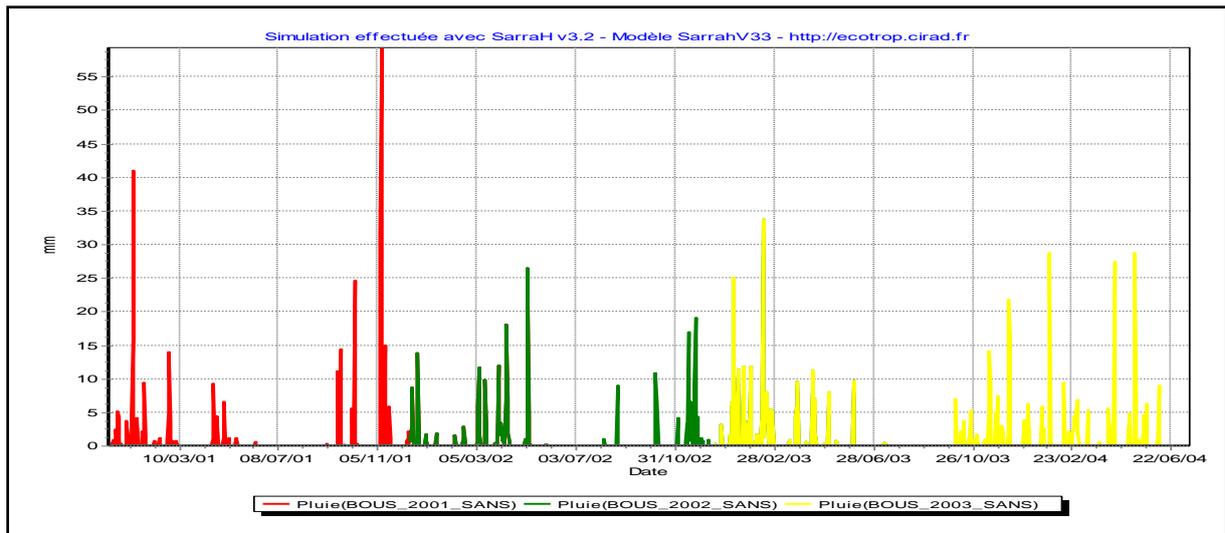
| Bibliographie

- stages at water deficits. *Colloids and Surfaces B : Biointerfaces*, 43 éd., Colloids and Surfaces B : Biointerfaces, 2005, pp. 221-227.
- [66] B. I. p., *Stratégies génomiques pour une meilleure tolérance au stress hydrique chez le blé dur (Triticum durum Desf)*. Université des Frères Mentouri Constantine Mémoire, 2016, pp. 1-22.
- [67] R. R. R. G. F. G. 2. Condon AG., *Breeding for high water-use efficiency.*, 55 éd., pp. 2447-2460.
- [68] H. YA, *Réponse de la luzerne (Medicago sativa L.) au stress hydrique et à la profondeur de semis*. Mémoire de mastère., Batna, 2006.
- [69] Y. Peng, 2008.
- [70] C. Y. J. P. Sestak L, *Plant Synthesis in Production manuals of methods.*, The Hague, 1971, pp. 343-381.
- [71] D.S.A(2013) : *Recueil des données sur la wilaya de Sidi Bel Abbès*
- [72] I. & BELLAHRECHE, 2020. [En ligne]. Available: <http://fr.madr.gov.dz/agriculture/statistiques-agricoles/>.
- [73] A. Guenfoud. *Le cycle de l'eau, l'assainissement des eaux usées et pluviales*, Carenen & Cap Atlantique pp 9-14-16-18.
- [74] O.N.M.(2014) : *Données météorologiques (précipitations et températures) de la ville de Sidi Bel Abbès*(Office Nationale de la Météorologie)
- [75] D.P.A.T. (2013) : *Recueil des données sur la wilaya de Sidi Bel Abbès (Direction de la programmation et de l'aménagement territorial)*
- [76] F. Giorgi, "Climate change hot-spots," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, no. 8, p. L08707, 2006, doi: 10.1029/2006GL025734.
- [77] M. Dingkuhn et al., "Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales," *Decision support tools for smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa : A practical guide*, 2003. <https://agritrop.cirad.fr/522837/> (accessed Feb. 02, 2023).
- [78] B. Sultan, C. Baron, M. Dingkuhn, B. Sarr, and S. Janicot, "Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 128, no. 1–2, pp. 93–110, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.agrformet.2004.08.005.
- [79] B. Sultan, C. Baron, M. Dingkuhn, B. Sarr, and S. Janicot, "Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 128, no. 1–2, pp. 93–110, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.agrformet.2004.08.005.
- [80] A. Mishra et al., "Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 148, no. 11, pp. 1798–1814, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.agrformet.2008.06.007.
- [81] P. Oettli, B. Sultan, C. Baron, and M. Vrac, "Are regional climate models relevant for crop yield prediction in West Africa?," *Environ. Res. Lett.*, vol. 6, no. 1, p. 014008, Jan. 2011, doi: 10.1088/1748-9326/6/1/014008.
- [82] S. B. Traoré et al., "Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa," *Atmosph. Sci. Lett.*, vol. 12, no. 1, pp. 89–95, Jan. 2011, doi: 10.1002/asl.295.
- [83] J.-C. Combres, I. Mialet-Serra, V. Bonnal, A. Flori, and M. Dingkuhn, "Ecopalm, simulation of seasonal yield production of oil palm," presented at the Final Meeting of ATP Reserves 11/2002 on Carbon Storage in Coconut, Oil Palm, Rubber and Mango, none: CIRAD, Nov. 2006, p. (14 vues).
- [84] J.-C. Combres, I. Mialet-Serra, V. Bonnal, A. Flori, and M. Dingkuhn, "Ecopalm, simulation of seasonal yield production of oil palm," presented at the Final Meeting of ATP Reserves

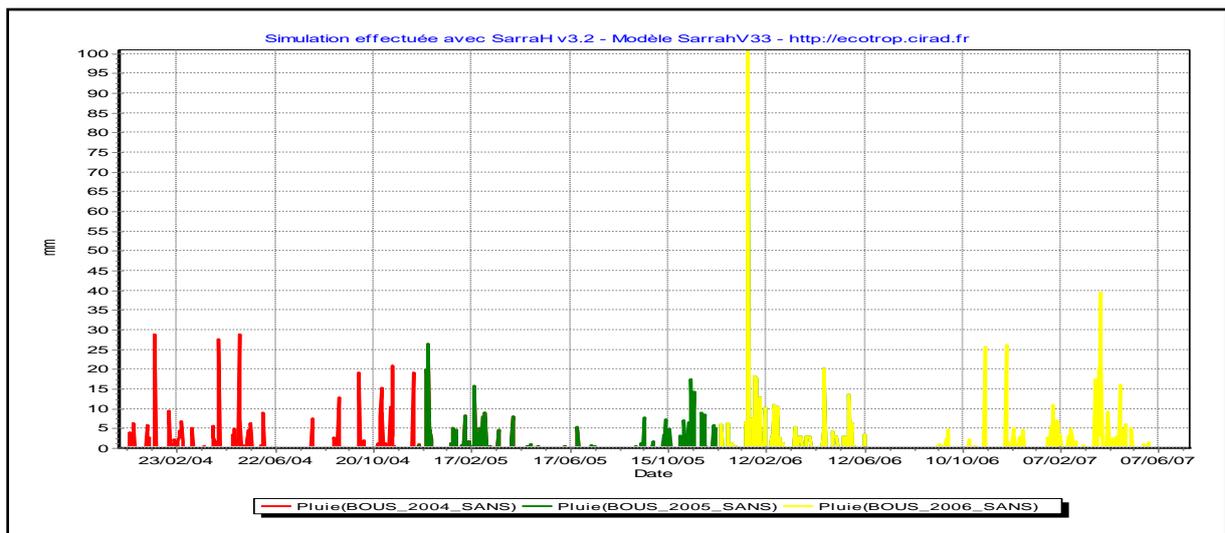
| *Bibliographie*

- 11/2002 on Carbon Storage in Coconut, Oil Palm, Rubber and Mango, none: CIRAD, Nov. 2006, p. (14 vues).
- [85] C. Baron, V. Bonnal, M. Dingkuhn, F. Maraux, and M. Sarr, "SARRA-H : Système d'Analyse Régional des Risques Agroclimatiques-Habillé (System for Regional Analysis of Agro-Climatic Risks)," Decision support tools for smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa : A practical guide, 2003. <https://agritrop.cirad.fr/522840/> (accessed Feb. 02, 2023).
- [86] C. Baron, F. Reyniers, A. Clopes, and F. Forest, "Applications du logiciel SARRA à l'étude de risques climatiques," Agriculture et Développement, 1999, Accessed: Feb. 02, 2023. [Online]. Available: <https://agritrop.cirad.fr/479550/>
- [87] T. Y. Oweis, Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas. in SWIM paper, no. 7. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 1999.
- [88] E. R. Perrier and A. B. Salkini, Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa: Proceedings of a Workshop on Regional Consultation on Supplemental Irrigation. ICARDA and FAO, Rabat, Morocco, 7-9 December, 1987. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991.
- [89] D. Ventrella et al., "Climate change impact on crop rotations of winter durum wheat and tomato in southern Italy: yield analysis and soil fertility," Ital J Agronomy, vol. 7, no. 1, p. 15, Mar. 2012, doi: 10.4081/ija.2012.e15.

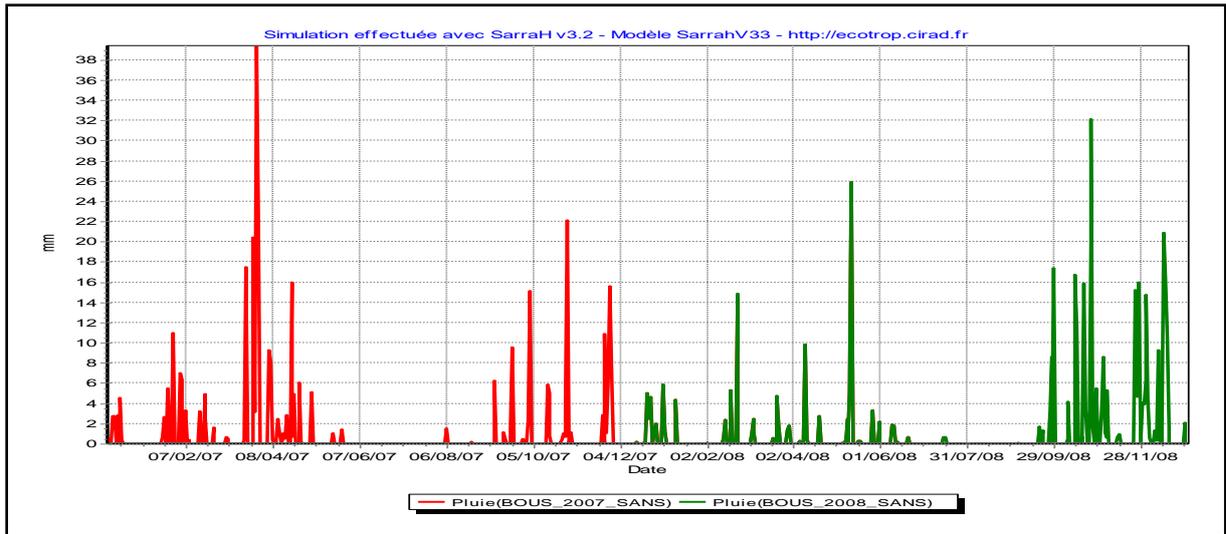
Annexe



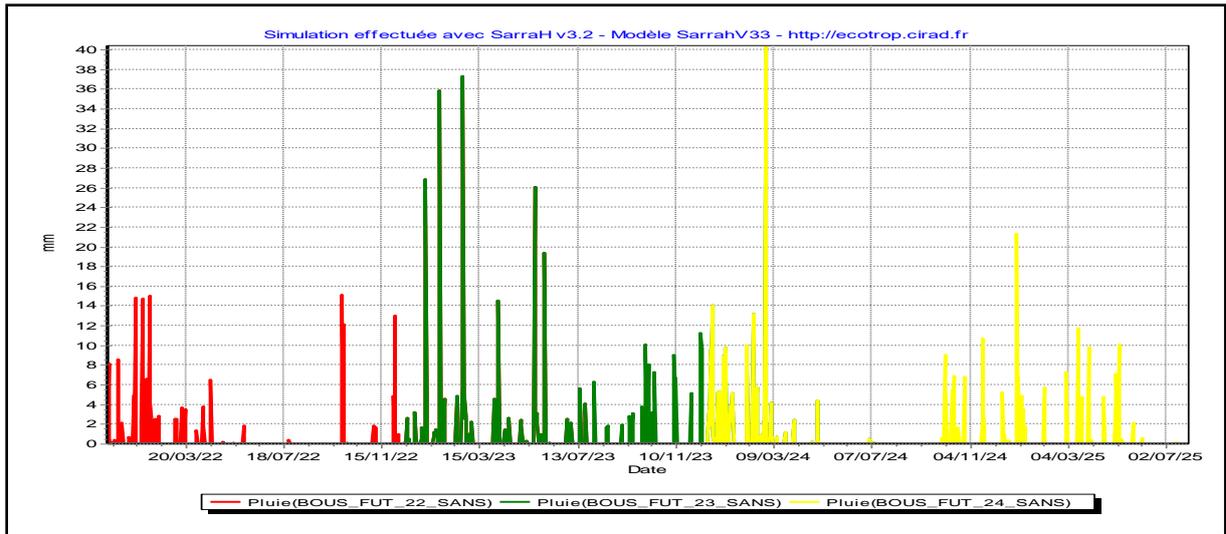
Résultats de simulation de la précipitation (2001-2003)



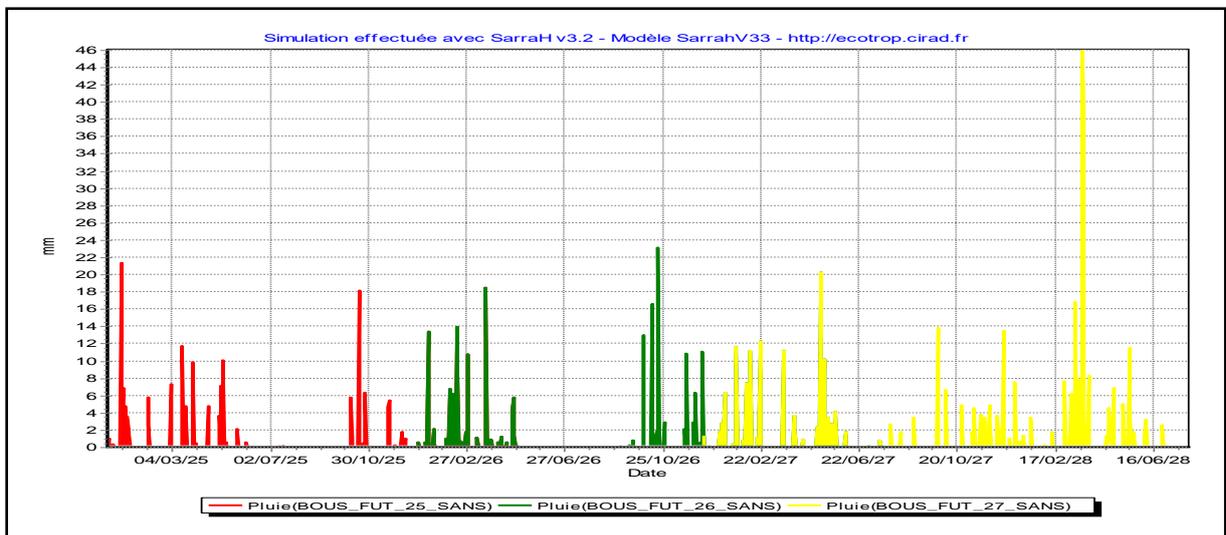
Résultats de simulation de la précipitation (2004-2006)



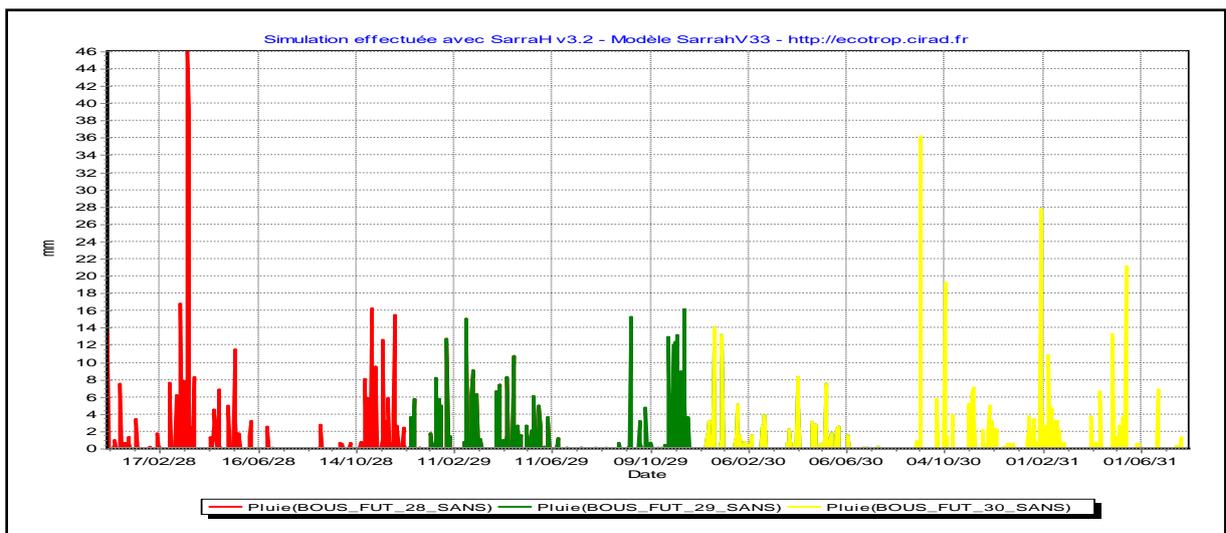
Résultats de simulation de la précipitation (2007-2008)



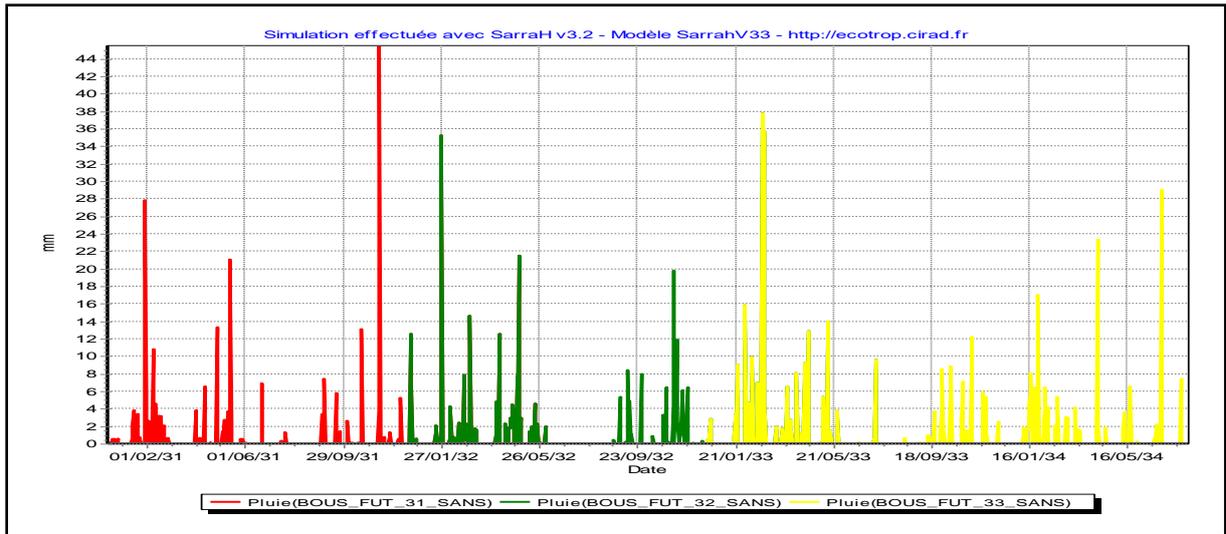
Résultats de simulation de la précipitation (2022-2024)



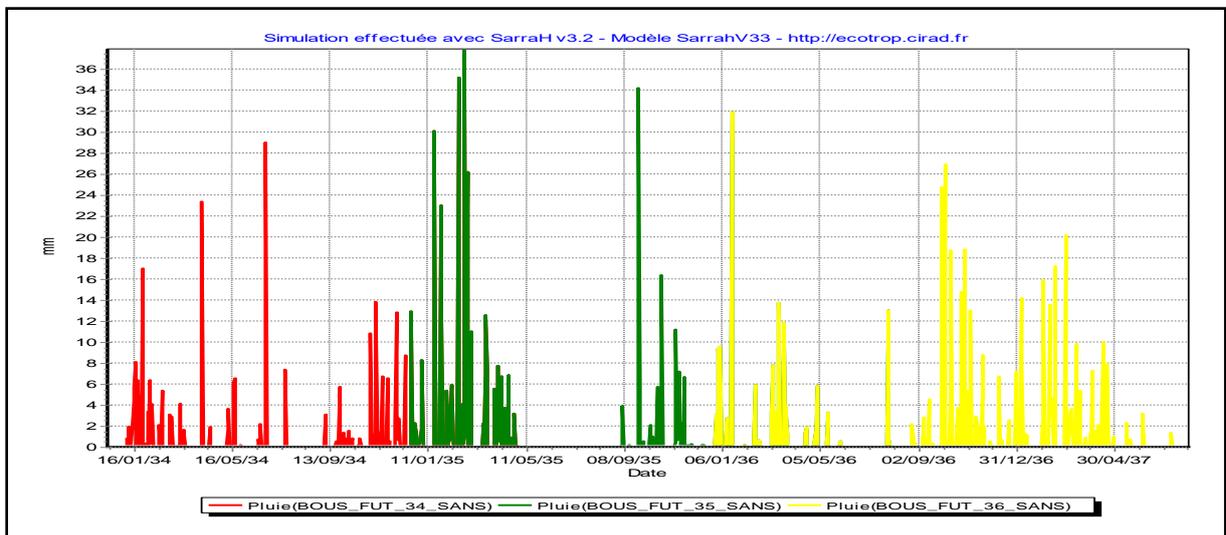
Résultats de simulation de la précipitation (2025-2027)



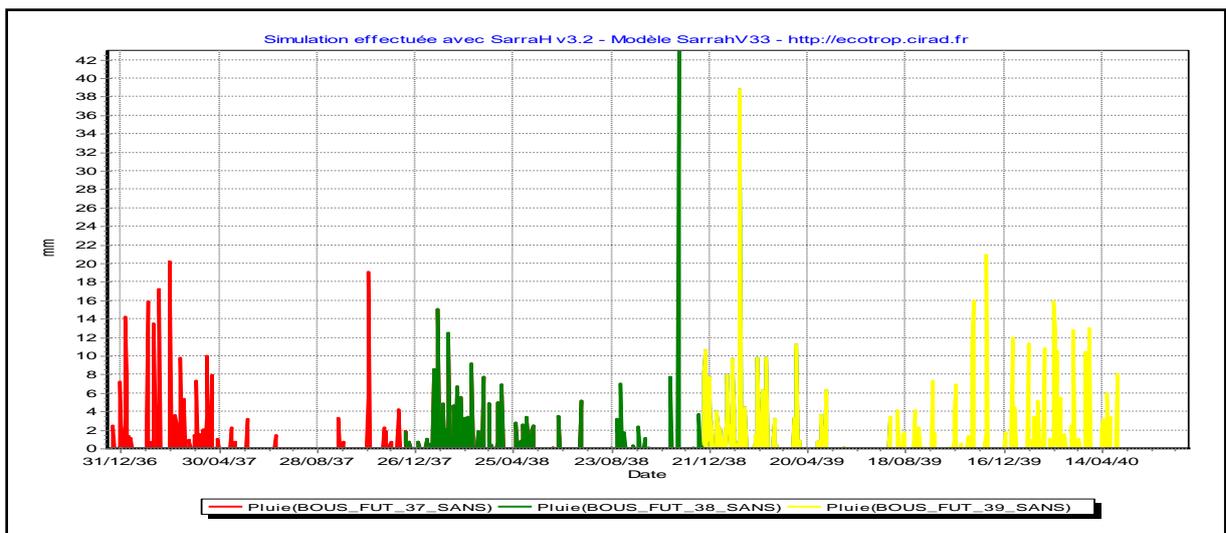
Résultats de simulation de la précipitation (2028-2030)



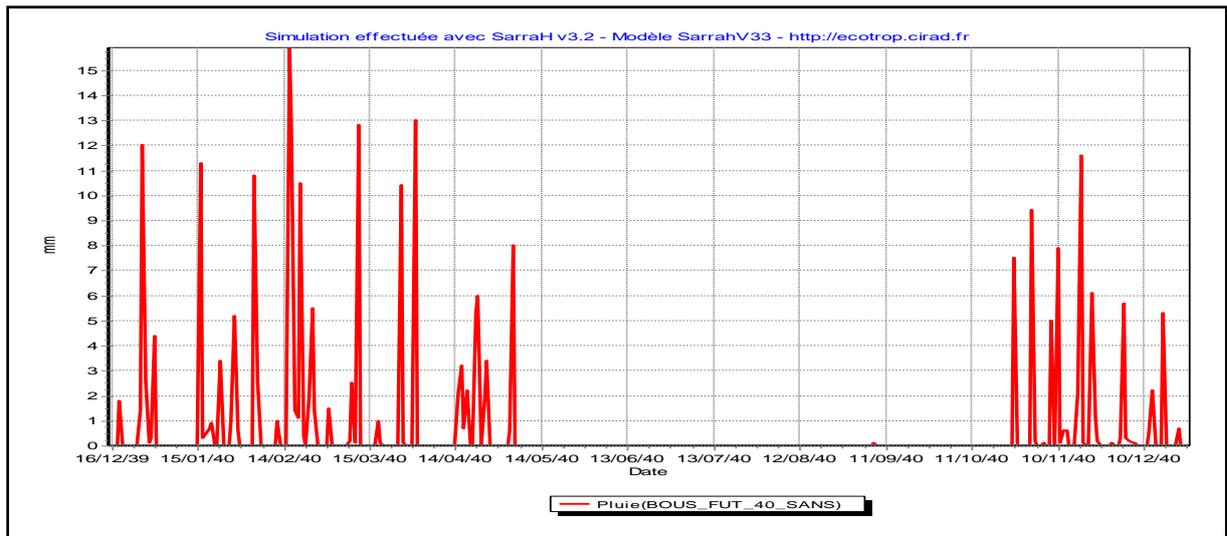
Résultats de simulation de la précipitation (2031-2033)



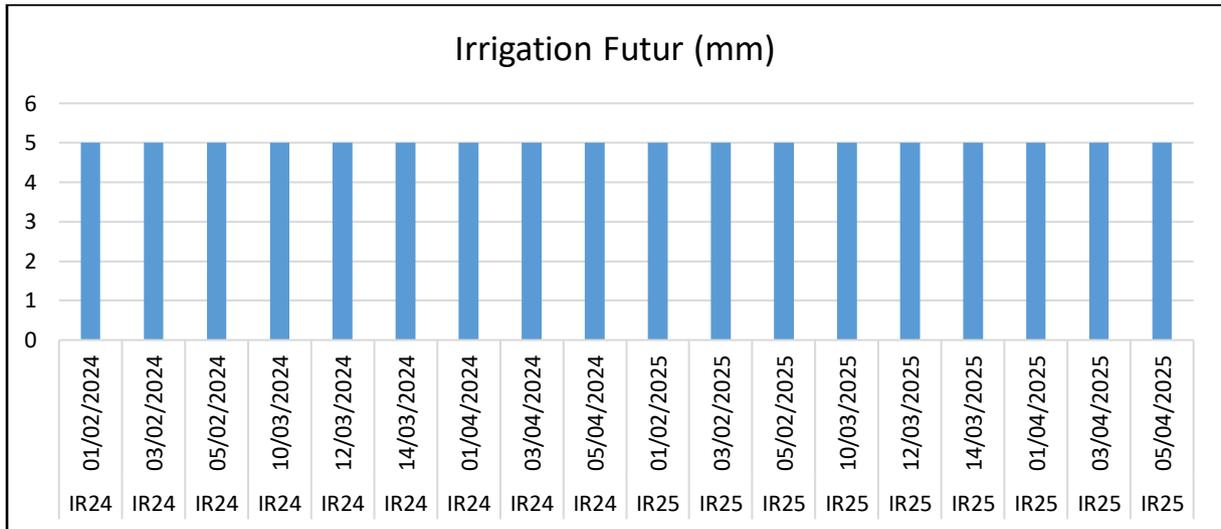
Résultats de simulation de la précipitation (2034-2036)



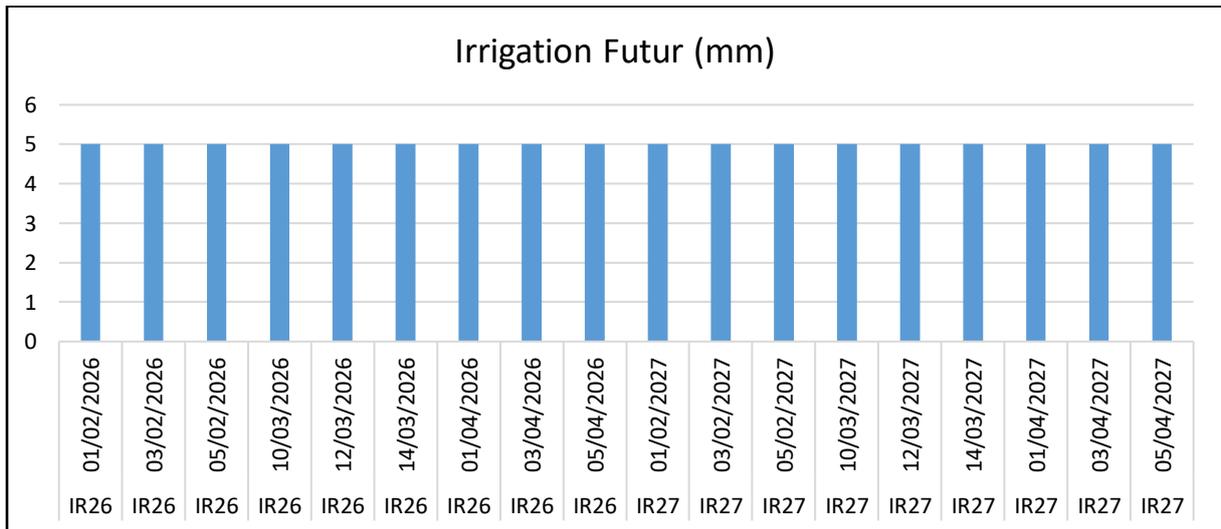
Résultats de simulation de la précipitation (2037-2039)



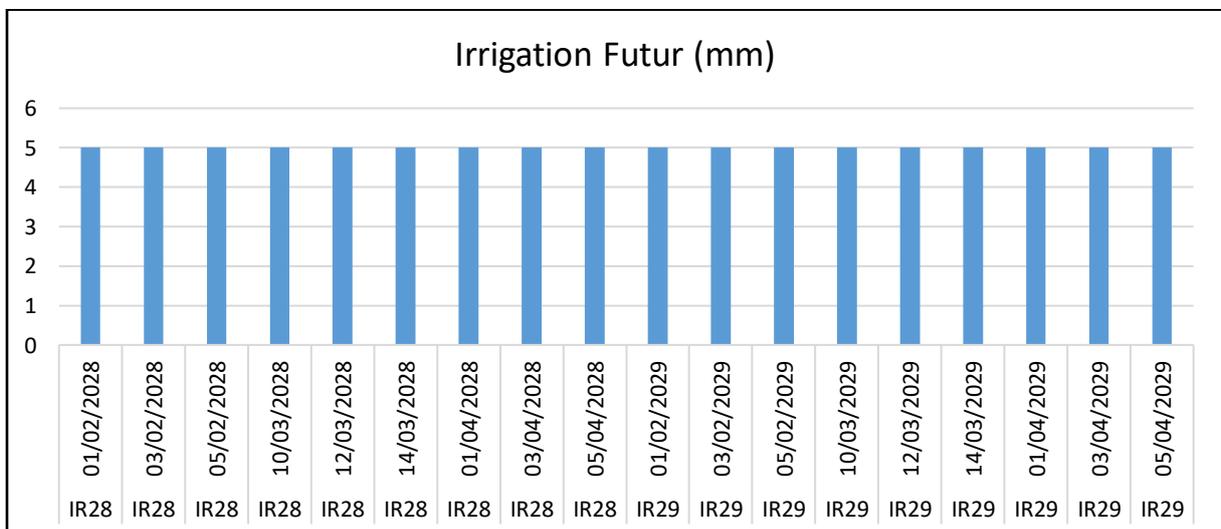
Résultats de simulation de la précipitation (2040)



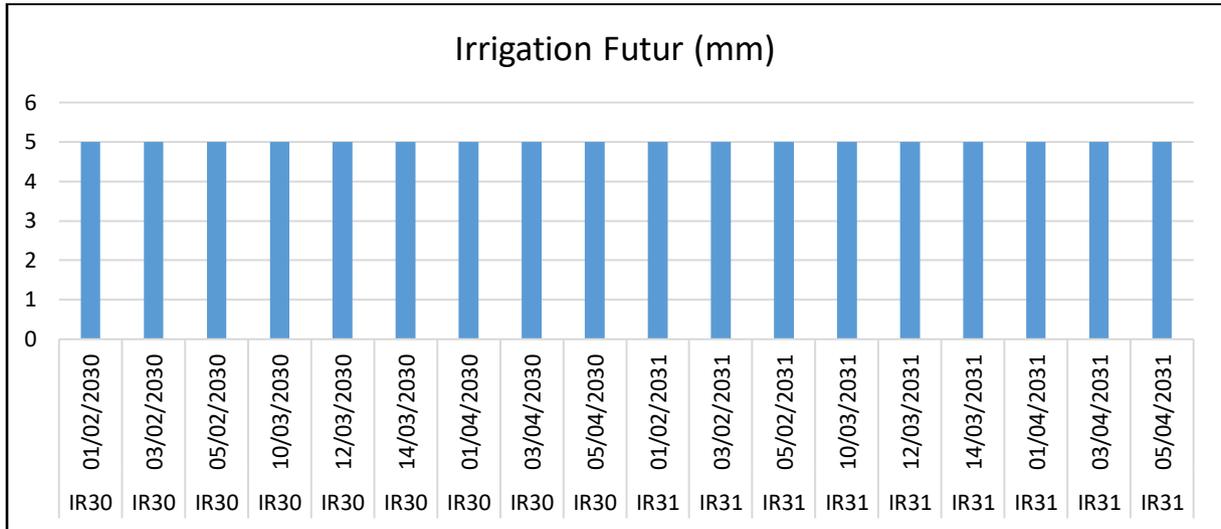
Irrigations créées en 2024-2025



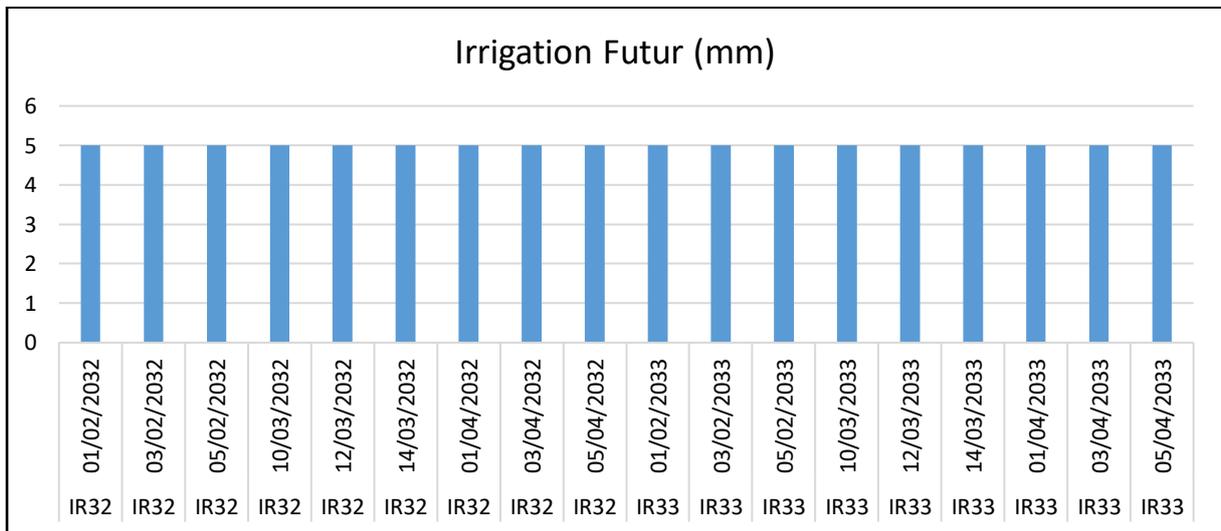
Irrigations créées en 2026-2027



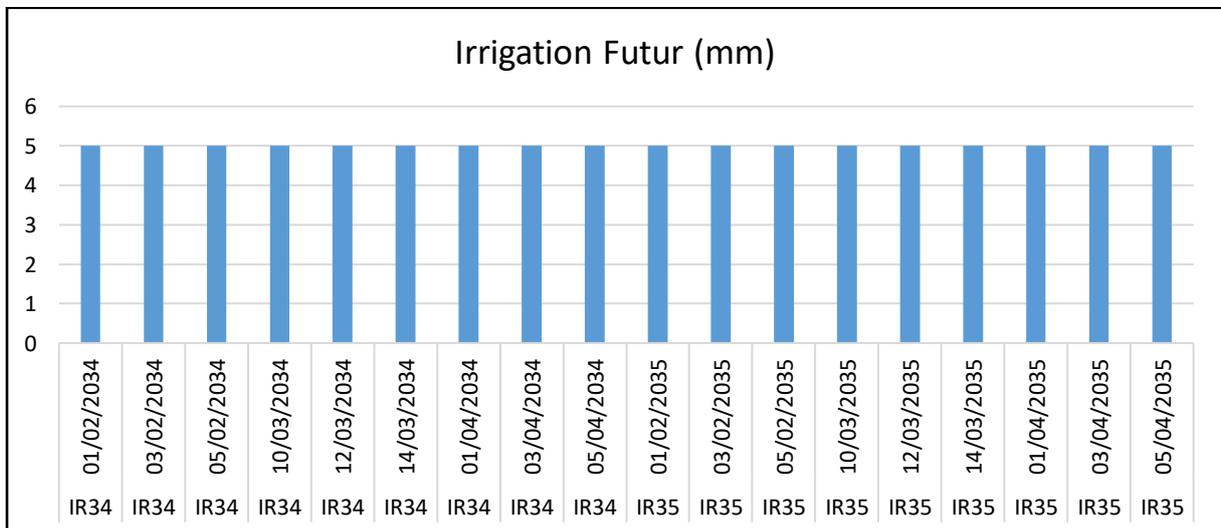
Irrigations créées en 2028-2029



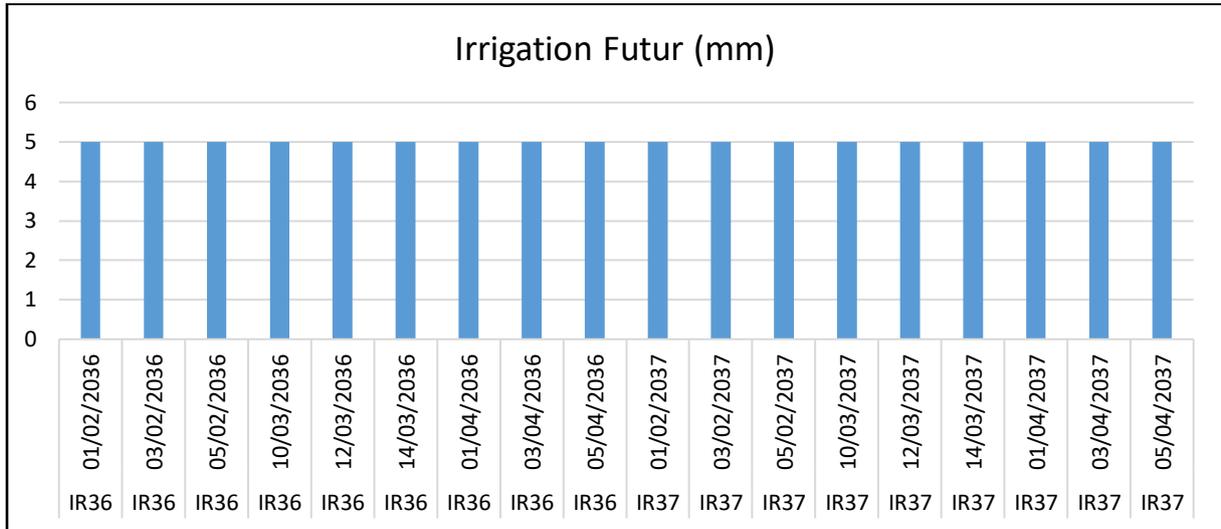
Irrigations créées en 2030-2031



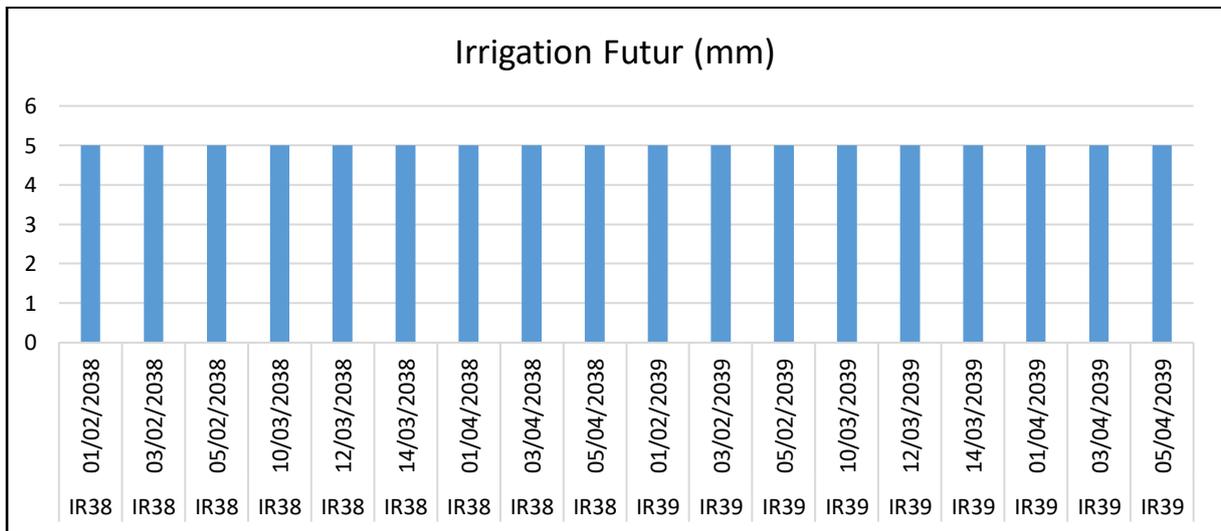
Irrigations créées en 2032-2033



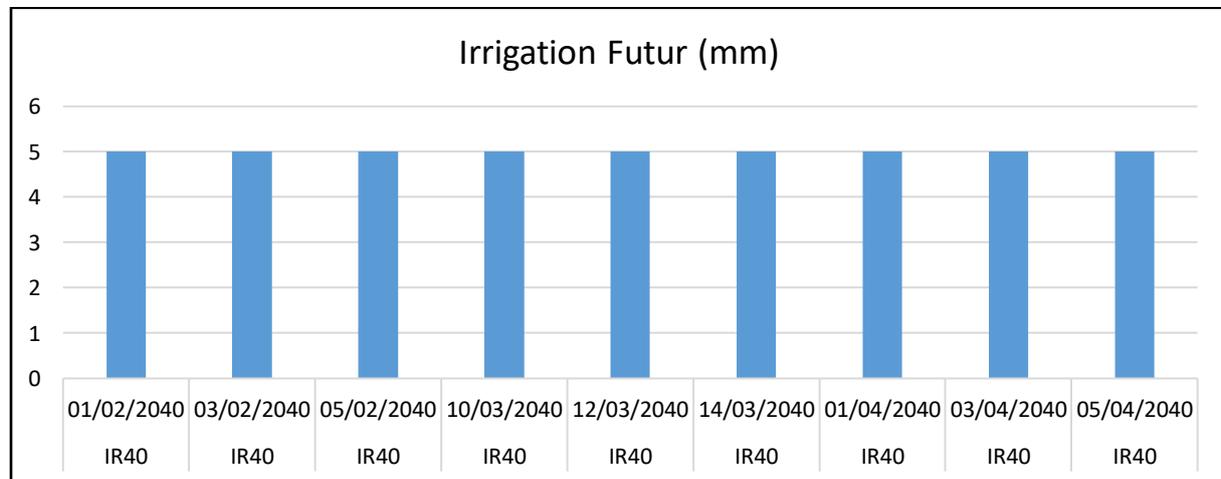
Irrigations créées en 2034-2035



Irrigations créées en 2036-2037



Irrigations créées en 2038-2039



Irrigations créées en 2040